

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

André Filipe Ferreira Alves

**Reabilitação de Edifícios visando a Eficiência Energética e
a Qualidade do Ambiente Interior**



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

André Filipe Ferreira Alves

**Reabilitação de Edifícios visando a Eficiência Energética e
a Qualidade do Ambiente Interior**

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação de
Doutora Sandra Maria Gomes Monteiro da Silva
Doutor Ricardo Filipe Mesquita da Silva Mateus

Julho de 2020

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho

Atribuição CC BY



<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Agradecimentos

Obrigado à professora Sandra Monteiro da Silva pela sua disponibilidade na orientação desta dissertação e por todas as correções e sugestões ao longo de todo o trabalho.

Obrigado à minha família por todo o apoio que sempre me deram e por terem guiado e deixado fazer as minhas escolhas ao longo destes anos. Agradeço à minha querida irmã por toda a sua ajuda ao longo destes últimos anos e também a todos os meus colegas de curso que me acompanharam nesta incrível jornada.

Obrigado ao Arquiteto Rui Torre, que disponibilizou a sua casa para estudo neste trabalho.

Por fim, agradeço à minha namorada por todo o amor, apoio e paciência.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Resumo

A reabilitação de edifícios surge inicialmente devido à necessidade de preservação do património arquitetónico antigo, no entanto, ao longo dos anos, a reabilitação de edifícios passou também a abranger os edifícios correntes, sendo considerada uma atividade fulcral no setor da construção. A reabilitação de um edifício aumenta a sua vida útil, mas também pode melhorar o seu desempenho energético e por consequência, aumentar os níveis de conforto dos seus ocupantes. A construção nova tem vários impactos a nível ambiental, tais como, o uso de uma grande quantidade de recursos não renováveis e a produção de resíduos e desperdícios ao longo de todo o processo da construção. Dando maior importância à reabilitação de edifícios, é possível também evitar a demolição dos mesmos e posterior construção nova, contribuindo assim para a diminuição do impacto ambiental do setor da construção. Este trabalho focou-se no estudo do impacto de medidas de reabilitação energética em edifícios residenciais, com o objetivo de avaliar o seu desempenho energético e qualidade do ambiente interior. Foi selecionada uma habitação unifamiliar construída em 1990 como caso de estudo. O desempenho do edifício foi estudado através de simulação dinâmica com o auxílio do programa *DesignBuilder*. Uma vez analisado o desempenho atual do edifício, foram propostas várias medidas de reabilitação por forma a melhorar a sua eficiência energética. Foi também realizado um estudo de viabilidade económica de cada medida de reabilitação, com o propósito de concluir qual a medida, ou combinação de medidas, seriam mais viáveis de aplicar aquando da reabilitação do edifício em estudo. Através da análise dos resultados obtidos conclui-se que a reabilitação deste edifício, não mostrou ser uma solução vantajosa a longo prazo, conseguindo reduzir os seus gastos energéticos anuais associados ao aquecimento, mas por outro lado, o investimento inicial não seria recuperado ao longo da vida útil do edifício reabilitado. Contudo, a reabilitação deste edifício terá outras vantagens, tais como, aumentar o conforto térmico dos ocupantes, melhorar a estética da fachada do edifício, aumentar a capacidade no combate ao aparecimento de humidade e bolor, valorizar o imóvel e aumentar o seu estado de preservação. As soluções ou combinações de soluções de reabilitação com melhor desempenho energético encontradas não foram as mais viáveis economicamente dado o elevado investimento inicial necessário. A combinação de soluções de reabilitação que apresentou resultados mais atrativos foi a combinação que contempla o reforço do isolamento térmico da cobertura e a substituição do tipo de vidro dos vãos envidraçados, com um período de retorno de investimento de 31 anos, tornando-a a solução mais viável para este caso de estudo.

Palavras-Chave: Reabilitação, Desempenho Energético, Simulação Dinâmica, Qualidade do Ambiente Interior, Viabilidade Económica

Abstract

The rehabilitation of buildings appears initially due to the need to preserve the architectural heritage, however, over the years, it has also come to cover conventional buildings, and it is considered a key activity in the construction sector. The rehabilitation of a building increases its useful life, and can also improve their energy performance and, consequently, increase the comfort conditions of its occupants. The construction of new buildings has several environmental implications, such as the use of a large amount of non-renewable resources and the production of waste materials throughout the construction process. Giving more importance to the rehabilitation of buildings can help to prevent their demolition and subsequent construction of new buildings, helping to lower the environmental problems in the construction sector.

This work focuses on the study of the impact of energy rehabilitation solutions on energy performance and indoor environmental quality of residential buildings. A case study was selected, a single-family house constructed in 1990. Building performance was studied using dynamic simulation analysis, using DesignBuilder software. First, the building, was modelled and then simulated in its original state. Subsequently, several rehabilitation solutions were proposed to improve its energy efficiency. Viability and economic studies were also performed for each rehabilitation solution, to verify which solution, or which combination of solutions, would be the most viable to apply when rehabilitating the building under study.

Through the analysis of the results obtained, it can be concluded that the rehabilitation of this building did not prove to be a viable option in the long term. While it was possible to reduce its annual heating energy costs, the initial investment would not be recovered over the rehabilitated building lifetime. However, the rehabilitation of this building has other advantages, such as, increasing the thermal comfort of the occupants, improving the aesthetics of the building's facade, increasing ability in combating the appearance of moisture and mold, increasing the property value and increasing its state of preservation. The solutions, or combinations of rehabilitation solutions, with the best energy performance, were not the most economical ones given the high initial investment required. The combination of rehabilitation solutions that showed the most attractive results was the combination that includes the reinforcement of the thermal insulation of the roof and the replacement of the type of glass in the windows, with a 31-year payback period, making it the most feasible solution or this case study.

Keywords: Rehabilitation, Energy Performance, Dynamic Simulation, Indoor Environmental Quality, Economic Viability

Índice

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 Enquadramento | 1 |
| 1.2 Objetivos | 2 |
| 1.3 Estrutura da dissertação | 2 |
| CAPÍTULO 2 - ESTADO DA ARTE | 4 |
| 2.1 Enquadramento Legislativo | 4 |
| 2.2 Parque habitacional Português | 6 |
| 2.2.1 Consumos energéticos dos edifícios em Portugal | 6 |
| 2.2.2 Desempenho energético dos edifícios | 8 |
| 2.2.3 Reabilitação de edifícios | 10 |
| 2.3 Principais patologias em edifícios | 11 |
| 2.3.1 Deterioração do revestimento exterior | 12 |
| 2.3.3 Patologias em coberturas | 13 |
| 2.3.4 Patologias em pavimentos | 14 |
| 2.4 Soluções de reabilitação energética e da qualidade do ambiente interior | 16 |
| 2.4.1 Isolamento térmico nas paredes exteriores | 16 |
| 2.4.2 Vãos envidraçados | 21 |
| 2.4.3 Coberturas | 22 |
| 2.4.4 Pavimentos | 25 |
| CAPÍTULO 3 – APRESENTAÇÃO DO CASO DE ESTUDO E METODOLOGIA | 27 |
| 3.1 Metodologia | 27 |
| 3.2 Apresentação do caso de estudo | 27 |
| 3.2.1 Características geométricas | 28 |
| 3.2.2 Características construtivas | 30 |
| 3.2.3 Sistemas de climatização | 34 |
| 3.3 Programa utilizado na modelação e simulação do edifício | 35 |
| 3.3.1 Definição do modelo de simulação energética do edifício | 35 |
| 3.3.2 Introdução da geometria do edifício | 36 |
| 3.3.3 Caracterização das zonas, atividade e sistemas de iluminação | 38 |
| 3.3.4 Inserção das soluções construtivas originais no programa | 43 |

| | |
|--|----|
| 3.3.5 Definição dos vãos envidraçados..... | 45 |
| 3.3.7 Definição do sistema de climatização..... | 48 |
| 3.4 Qualidade do ambiente interior | 51 |
| 3.5 Metodologia para a análise do conforto térmico..... | 52 |
| 3.6 Metodologia para a análise económica do caso de estudo | 54 |
| CAPÍTULO 4 - DESEMPENHO ENERGÉTICO DO EDIFÍCIO | 59 |
| 4.1 Qualidade do ambiente interior | 59 |
| 4.2 Simulação do desempenho energético do edifício..... | 61 |
| 4.3 Simulação do edifício - medidas de reabilitação isoladas | 65 |
| 4.4 Simulação do edifício - combinação de medidas de reabilitação..... | 67 |
| 4.5 Análise económica..... | 69 |
| CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES e PERSPETIVAS FUTURAS | 75 |
| 5.1 Conclusão | 75 |
| 5.2 Proposta para trabalhos futuros | 78 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 79 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Número total de edifícios licenciados ao longo dos anos | 6 |
| Figura 2 - Consumo de energia final total e por tipo de sector consumidor | 7 |
| Figura 3 - Consumos totais por tipo de fonte energética | 8 |
| Figura 4 - Evolução no desempenho energético dos edifícios entre 1950 e 2013 | 9 |
| Figura 5 - Patologias mais frequentes no revestimento exterior dos edifícios (descolagem do material (A), manchas de eflorescências (B) e fissuração (C)) | 13 |
| Figura 6 - Abertura de juntas entre os elementos de madeira | 15 |
| Figura 7 - Aplicação de isolamento pelo interior de paredes – execução de contra-fachada de alvenaria e contra-fachada de gesso cartonado | 17 |
| Figura 8 - Injeção de espuma de poliuretano na caixa de ar de uma parede dupla | 17 |
| Figura 9 - Revestimento independente com isolante térmico na caixa-de-ar | 19 |
| Figura 10 - Aspeto da realização de um sistema ETICS | 19 |
| Figura 11 - Sistema ETICS com revestimento espesso | 20 |
| Figura 12 - Sistema ETICS com revestimento delgado | 20 |
| Figura 13 - Revestimento isolante pré-fabricado | 21 |
| Figura 14 - Colocação de isolamento na esteira de um desvão não habitável, à esquerda, e na vertente de um desvão habitável, à direita | 23 |
| Figura 15 - Cobertura invertida | 24 |
| Figura 16 - Cobertura com isolamento suporte de impermeabilização | 24 |
| Figura 17 - Isolamento térmico inferior | 25 |
| Figura 18 - Isolamento térmico intermédio | 25 |
| Figura 19 - Isolamento térmico superior | 26 |
| Figura 20 - Imagem satélite do edifício em estudo | 27 |
| Figura 21 - Planta da cave (dimensões em metros) | 28 |
| Figura 22 - Planta do rés do chão (dimensões em metros) | 29 |
| Figura 23 - Planta do 1º andar (dimensões em metros) | 29 |
| Figura 24 - Planta da cobertura (dimensões em metros) | 30 |
| Figura 25 - Solução construtiva das paredes exteriores | 31 |
| Figura 26 - Solução construtiva das paredes interiores e paredes divisórias | 31 |
| Figura 27 - Solução construtiva da laje da cave em contacto com o solo | 32 |
| Figura 28 - Solução construtiva da laje de separação da cave com o R/C | 32 |

| | |
|---|----|
| Figura 29 - Solução construtiva da laje de separação do R/C com o 1º andar..... | 32 |
| Figura 30 - Laje da cobertura..... | 33 |
| Figura 31 - Vãos envidraçados com caixilharia em madeira de Kambala e suas características | 34 |
| Figura 32 - Vista e Localização da caldeira a gás natural | 34 |
| Figura 33 - Radiador a água..... | 35 |
| Figura 34 - Criação de novo projeto no programa de simulação..... | 36 |
| Figura 35 - Modelo do edifício concluído | 37 |
| Figura 36 - Vistas do modelo do edifício | 37 |
| Figura 37 - Secção Activity (Atividade) relativa à cozinha do edifício | 39 |
| Figura 38 - Representação do modelo de simulação da cave e do R/C do edifício..... | 39 |
| Figura 39 - Representação do modelo de simulação do 1º anda e da garagem do edifício..... | 40 |
| Figura 40 - Janela de definição da iluminação artificial | 40 |
| Figura 41 - Utilização, em percentagem, da iluminação artificial durante a estação de aquecimento | 41 |
| Figura 42 - Utilização, em percentagem, da iluminação artificial durante a estação de arrefecimento | 41 |
| Figura 43 - Ocupação diária simplificada da cozinha do edifício | 42 |
| Figura 44 - Ocupação diária simplificada da sala do edifício | 42 |
| Figura 45 - Ocupação diária simplificada dos escritórios do edifício | 43 |
| Figura 46 - Ocupação diária simplificada dos quartos do edifício | 43 |
| Figura 47 - Secção Construction (Construção) do programa | 44 |
| Figura 48 - Secção de definição de um elemento construtivo..... | 45 |
| Figura 49 - Secção de definição dos vãos envidraçados..... | 46 |
| Figura 50 - Schedule (Horário) de funcionamento dos sistemas de sombreamento (estores) na estação de aquecimento | 46 |
| Figura 51 - Schedule (Horário) de funcionamento dos sistemas de sombreamento (estores) na estação de arrefecimento..... | 47 |
| Figura 52 - Definição dos vãos envidraçados | 47 |
| Figura 53 - Janela de definição do sistema HVAC | 49 |
| Figura 54 - Schedule (horário) de abertura de janelas na estação de aquecimento..... | 50 |
| Figura 55 - Schedule (horário) de abertura de janelas na estação de arrefecimento | 50 |
| Figura 56 - Análise da situação de conforto térmico – modelo adaptativo da ASHRAE 55:2017..... | 53 |
| Figura 57 - Projeção do preço do gás natural | 55 |
| Figura 58 - Solução construtiva das paredes exteriores após aplicação do sistema ETICS | 56 |

| | |
|---|----|
| Figura 59 - Solução construtiva da cobertura após aplicação da medida de reabilitação | 57 |
| Figura 60 - Análise da situação de conforto térmico dos ocupantes da sala para a uma semana típica de verão - edifício na situação atual (esquerda) e após a reabilitação (direita) | 64 |
| Figura 61 - Custos acumulados - Soluções de reabilitação e edifício original | 73 |
| Figura 62 - Custos acumulados - Combinações de medidas de reabilitação e edifício original..... | 74 |

Índice de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Tipos e exemplos de patologias | 12 |
| Tabela 2 - Patologias em coberturas planas | 14 |
| Tabela 3 - Patologias em pavimentos cerâmicos e pétreos | 15 |
| Tabela 4 - Vantagens e inconvenientes do isolamento térmico colocado pelo exterior em relação ao isolamento térmico colocado pelo interior | 18 |
| Tabela 5 - Evolução ao longo dos anos das técnicas construtivas das coberturas inclinadas..... | 23 |
| Tabela 6 - Dados térmicos relativos às soluções construtivas dos pavimentos e cobertura do edifício | 33 |
| Tabela 7 - Caracterização das zonas e atividade..... | 38 |
| Tabela 8 - Templates (Modelos) HVAC (Aquecimento, ventilação e ar condicionado) utilizados | 48 |
| Tabela 9 - Temperaturas do termostato na estação de aquecimento e arrefecimento | 49 |
| Tabela 10 - Carga sensorial de poluentes emitidos pelos ocupantes | 51 |
| Tabela 11 - Carga sensorial de poluentes emitidos pelos materiais do edifício | 51 |
| Tabela 12 - Custos de intervenção para cada medida de reabilitação proposta | 54 |
| Tabela 13 - Dados térmicos da solução construtiva de reabilitação da parede exterior para diferentes espessuras de isolamento térmico | 57 |
| Tabela 14 - Dados térmicos da solução construtiva de reabilitação da cobertura para diferentes espessuras de isolamento térmico | 58 |
| Tabela 15 - Dados térmicos das soluções de vãos envidraçados propostos | 58 |
| Tabela 16 - Cálculo da taxa de ventilação para cada zona | 60 |
| Tabela 17 - Distribuição dos ganhos térmicos do edifício por tipo de fonte | 61 |
| Tabela 18 - Consumos energéticas do edifício no seu estado original..... | 62 |
| Tabela 19 - Análise das condições de conforto térmico para uma semana típica de verão | 64 |
| Tabela 20 - Consumos energéticos de aquecimento - reforço do nível de isolamento térmico das paredes exteriores | 65 |
| Tabela 21 - Consumos energéticos para aquecimento - reforço do nível de isolamento térmico da cobertura | 66 |
| Tabela 22 - Consumos energéticas de aquecimento - vãos envidraçados | 67 |
| Tabela 23 - Combinação de medidas de reabilitação | 68 |
| Tabela 24 - Consumos energéticos associados ao aquecimento para cada combinação de medidas de reabilitação..... | 68 |
| Tabela 25 - Variação dos consumos energéticos para aquecimento e custo de investimento de cada medida de reabilitação individual | 69 |

| | |
|--|----|
| Tabela 26 - Variação dos consumos energéticos para aquecimento e custo de investimento para cada combinação de medidas de reabilitação..... | 70 |
| Tabela 27 - Estimativa das possíveis poupanças de custos relativos à redução dos consumos energéticos associados ao aquecimento e período de retorno de investimento - medidas de reabilitação individuais ... | 71 |
| Tabela 28 - Estimativa das possíveis poupanças de custos relativos à redução dos consumos energéticos associados ao aquecimento e período de retorno de investimento - combinação de medidas de reabilitação | 71 |

Lista de Símbolos e Abreviaturas

| | |
|-----------------|---|
| AVAC | Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado |
| CEN | Comité Europeu de Normalização |
| CO ₂ | Dióxido de Carbono |
| DHW | <i>Domestic Hot Water</i> (AQS – água quente sanitária) |
| EPBD | <i>Energy Performance of Building Directive</i> (Diretiva relativa ao desempenho energético dos edifícios) |
| EPS | Poliestireno Expandido |
| ETICS | <i>External Thermal Insulation Composite System</i> (Sistemas compósitos de isolamento térmico pelo exterior) |
| UE | União Europeia |
| HVAC | <i>Heating, Ventilation and Air Conditioning</i> (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado) |
| MW | Lã Mineral |
| nZEB | <i>Nearly Zero Energy Buildings</i> (edifícios com necessidades quase nulas de energia) |
| PDM | Plano Diretor Municipal |
| PPD | Porcentagem de Pessoas Descontentes |
| R | Resistência Térmica |
| RCCTE | Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios |
| RECS | Regulamento de Desempenho Energético dos edifícios de Comércio e Serviços |
| REH | Regulamento de Desempenho Energético dos edifícios de Habitação |
| RSECE | Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização dos Edifícios |
| SCE | Sistema de Certificação Energética |
| U | Coefficiente de Transmissão Térmica |
| Ws | Limite de Saturação |
| XPS | Poliestireno Expandido Extrudido |

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

O Homem passa grande parte do seu tempo no interior de edifícios (cerca de 90%) (Klepeis *et al.*, 2001), sendo de extrema importância garantir a qualidade do ambiente interior dos espaços (boas condições de conforto térmico, acústico e lumínico e qualidade do ar interior), de modo a assegurar a saúde, bem-estar e produtividade dos seus ocupantes. Assegurar estas condições pode conduzir a consumos energéticos consideráveis, que por consequência conferem aos edifícios de habitação uma grande percentagem dos consumos totais de energia de um país.

Segundo dados estatísticos (de 2016) da Comissão Europeia, os edifícios são responsáveis por 40% dos consumos de energia e os edifícios residenciais representam cerca de 25.7% do consumo total de energia na Europa, sendo um dos principais setores responsáveis pelo consumo de energia, consumindo mais energia do que a indústria, que representa cerca de 25% do consumo total de energia na Europa (“EEA”, 2018). O único setor que ultrapassa estes consumos é o setor dos transportes, que representa 33.2% do consumo total de energia (“EEA”, 2018).

Por forma a intervir na redução do consumo energético referente aos edifícios é fundamental investir cada vez mais na sua reabilitação energética, destacando os edifícios de habitação, principalmente os edifícios com data de construção antes da publicação do RCCTE (Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios) em 1990.

Em Portugal, a reabilitação de edifícios tem vindo a despertar grande interesse nos últimos anos, como consequência de uma maior consciencialização para a preservação do património edificado. Segundo dados oficiais mais recentes do Instituto Nacional de estatística, em 2018 a reabilitação foi responsável por cerca de 26.4% de todas as obras concluídas, sendo os restantes 73.6% relativos à construção nova (INE, 2019).

Segundo um estudo da Faculdade de Economia da Universidade do Porto, há cerca de 918 mil edifícios em Portugal com necessidades de reabilitação, em que cerca de 200 mil edifícios se encontram em perigo de ruína e a carecer de intervenções profundas (“Metade das habitações precisa de obras”, 2014). Deverá assim, ser dada mais importância à reabilitação de edifícios ao invés da construção nova, conseguindo desta forma aumentar a renovação do parque habitacional Português, reduzindo, simultaneamente, o número de

edifícios abandonados e/ou em perigo de ruína. A reabilitação tem também um papel importante na melhoria do desempenho energético de edifícios ocupados, que carecem de condições de conforto e apresentam elevados consumos energéticos, consequência de uma má qualidade térmica da sua envolvente.

1.2 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é estudar a eficiência energética e a qualidade do ambiente interior de edifícios residenciais a nível nacional, com especial destaque para a reabilitação de edifícios existentes. A reabilitação visa definir medidas de eficiência energética (reforço do isolamento térmico da envolvente, alteração dos vãos envidraçados, entre outros), que possam ser implementadas em edifícios, reduzindo os seus consumos energéticos e, simultaneamente, melhorando a sua qualidade do ambiente interior.

Com o auxílio de um software de simulação dinâmica este trabalho pretende simular o comportamento termo-energético de um edifício, incluindo diferentes medidas de reabilitação e analisar o impacto que essas medidas terão no edifício ao nível do seu desempenho energético e do conforto dos seus ocupantes.

Como resultado final deste trabalho de investigação pretende-se identificar e selecionar qual/quais a(s) proposta(s) mais adequada(s) para que, após a implementação do projeto de reabilitação energética, seja possível garantir uma redução substancial dos consumos energéticos do edifício, uma boa qualidade do ambiente interior, e, conseqüentemente, o bem-estar dos seus ocupantes.

1.3 Estrutura da dissertação

O trabalho realizado no âmbito desta dissertação está dividido ao longo de cinco capítulos principais.

Um breve enquadramento ao tema desenvolvido ao longo da dissertação, realçando o foco e a relevância do trabalho realizado, está descrito no Capítulo 1 – INTRODUÇÃO. Ainda neste capítulo estão descritos os objetivos gerais do presente trabalho e a estrutura da dissertação.

No Capítulo 2 – ESTADO DE ARTE – é apresentada uma visão global sobre o conhecimento na área da reabilitação energética de edifícios residenciais em Portugal. São abordados temas como as políticas energéticas, a caracterização do parque habitacional Português, os consumos energéticos dos edifícios em Portugal e das principais patologias presentes nos edifícios.

No Capítulo 3 – APRESENTAÇÃO DO CASO DE ESTUDO E METODOLOGIA – é apresentado o edifício escolhido como caso de estudo para a análise. São descritas as suas características geométricas, bem como as soluções construtivas. Ainda no Capítulo 3 são explicadas as metodologias de trabalho utilizadas na modelação e simulação do edifício para o estudo realizado.

A apresentação das medidas de reabilitação e dos principais resultados obtidos, após as simulações efetuadas antes e depois da aplicação das medidas de reabilitação propostas, estão reportados no capítulo 4 – CASO DE ESTUDO: RESULTADOS. Neste capítulo é também feita uma análise de viabilidade económica das intervenções de reabilitação estudadas.

Por fim, o Capítulo 5 – CONCLUSÃO, resume as principais conclusões do trabalho. Perspetivas e propostas para trabalhos futuros estão também apresentadas neste mesmo capítulo.

CAPÍTULO 2 - ESTADO DA ARTE

2.1 Enquadramento Legislativo

Em 2002, foi publicada a Diretiva 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho relativa ao desempenho energético dos edifícios (EPBD – *Energy Performance of Buildings Directive*), com o objetivo de implementar medidas de melhoria da eficiência energética de edifícios (novos ou sujeitos a grandes obras de reabilitação). Esta diretiva baseava-se na promoção da melhoria do desempenho energético dos edifícios tendo em conta as condições climáticas externas, as condições locais, exigências em matéria de clima interior e também a rentabilidade económica. Também foi imposto por esta diretiva que se caracterizasse energeticamente os edifícios através de uma certificação energética e que se efetuassem inspeções regulares de caldeiras e instalações de ar condicionado nos edifícios (Directiva 2002/91/CE, 2003). Por forma a transpor a Diretiva 2002/91/CE, em Portugal, a 4 de abril de 2006, foi aprovado um novo pacote legislativo que englobava os seguintes Decretos-Lei:

- SCE – Decreto-Lei 78/2016 – Sistema de Certificação Energética (Decreto Lei nº 78/2016, 2016);
- RSECE – Decreto-Lei 79/2006 – Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização dos Edifícios (Decreto Lei nº 79/2006, 2006);
- RCCTE – Decreto-Lei 80/2006 – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (Decreto Lei nº 80/2006, 2006).

A Diretiva 2002/91/CE foi reformulada em 2010, surgindo a Diretiva 2010/31/EU (EPBD-recast). Uma das principais reformulações foi a imposição de que todos os edifícios novos teriam de ser edifícios com necessidades quase nulas de energia (nZEB – *nearly zero energy buildings*) a partir de 2020, a partir de 2018 para edifícios públicos (Directiva 2010/31/EU, 2010).

A Estratégia Europa 2020 que surgiu em junho de 2011, tinha vários objetivos definidos, sendo um deles de cariz climático e energético. Este objetivo, referido como as metas “20-20-20”, definia a redução em 20% das emissões de gases com efeito de estufa relativamente aos níveis de 1990, o aumento em 20% do uso de energia proveniente de fontes renováveis e um acréscimo de 20% na eficiência energética dos edifícios até 2020 (“EAPN”, 2011). A única meta atingida pela União Europeia até à data da escrita desta dissertação foi a meta relativa à redução das emissões de gases com efeito de estufa, tendo sido atingida em 2018

(Conselho Europeu, 2018). Portugal conseguiu também atingir esta meta em 2018 apresentando uma redução de 21% na emissão de gases com efeito de estufa (“Plano Nacional de Energia e Clima”, 2020).

A Diretiva 2012/27/EU veio complementar a Diretiva 2010/31/EU, impondo que, a partir de 1 de janeiro de 2014, fosse feita uma renovação anual de 3% da área construída total dos edifícios aquecidos e/ou arrefecidos. Era exigido também a todos os Estados-Membros que certificassem energeticamente todos os edifícios públicos com mais de 500 m² (ou mais de 1000 m² a partir de 9/7/2015) (Directiva 2012/27/EU de 25, 2012). Esta Diretiva impôs também que todos os Estados-Membros apresentassem os seus Planos de Ação Nacionais relativos à Eficiência Energética até 30 de abril de 2014 e depois de três em três anos (Directiva 2012/27/EU, 2012).

A 20 de agosto de 2013, Portugal aprovou o Decreto-Lei 118/2013 e o correspondente pacote legislativo, que transpôs a Diretiva 2010/31/EU. Este Decreto-Lei visa melhorar o desempenho energético dos edifícios através do Sistema de Certificação Energética de Edifícios (SCE) que contém o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifício de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS) (Decreto Lei n° 118/2013, 2013).

Em 2018 foi publicada a Diretiva (EU) 2018/844 do Parlamento Europeu e do Conselho, que veio reformular a Diretiva 2010/31/EU relativa ao desempenho energético dos edifícios e a Diretiva 2012/27/EU sobre eficiência energética. A renovação do parque edificado já existente foi um dos principais objetivos propostos pela Diretiva 2018/844.

Como forma de incentivar ainda mais a reabilitação em Portugal, foi publicado a 18 de julho de 2019, o Decreto-Lei 95/2019, que se aplica a edifícios ou frações autónomas, que visa promover a reabilitação e criar as condições para que esta seja a principal forma de intervenção ao nível do edificado e do desenvolvimento urbano. Em termos de comportamento térmico e eficiência energética, o Decreto-Lei 95/2019 foca-se numa melhor gestão do consumo de energia, ainda que garantindo os níveis de conforto e habitabilidade nas habitações, incentivando assim à melhoria progressiva do desempenho térmico e energético dos edifícios (Decreto Lei n° 95/2019, 2019).

A União Europeia estabeleceu também metas para 2030 e 2050 no âmbito da ação climática, sendo que para 2030 as metas propostas se baseiam na redução em, pelo menos, 40% das emissões de gases com efeito de estufa, no aumento de, pelo menos, 32% do uso de energia proveniente de fontes renováveis e no

aumento até 32.5% da eficiência energética dos edifícios em relação aos dados de 1990 (Comissão Europeia, 2018a). Para 2050, ambiciona-se que haja uma redução entre 80 a 95% das emissões de gases com efeito de estufa em relação aos níveis de 1990. Como consequência do cumprimento das metas estabelecidas, espera-se que até 2050, a Europa represente um impacto no clima praticamente neutro (Comissão Europeia, 2018b).

2.2 Parque habitacional Português

Segundo dados mais recentes do Instituto Nacional de Estatística (INE, 2018a), Portugal possui cerca de 5.95 milhões de alojamentos familiares clássicos, sendo que 5.7 milhões pertencem ao território continental, 112 mil pertencem à Região Autónoma dos Açores e 131 mil localizam-se na Região Autónoma da Madeira (INE, 2018a). Até 2018 foram licenciados cerca de 3 642 977 edifícios (Figura 1), sendo que os edifícios com data de construção anterior a 1981 representam quase 70% do parque habitacional Português (69.57%) (PORDATA, 2011; INE, 2018b).

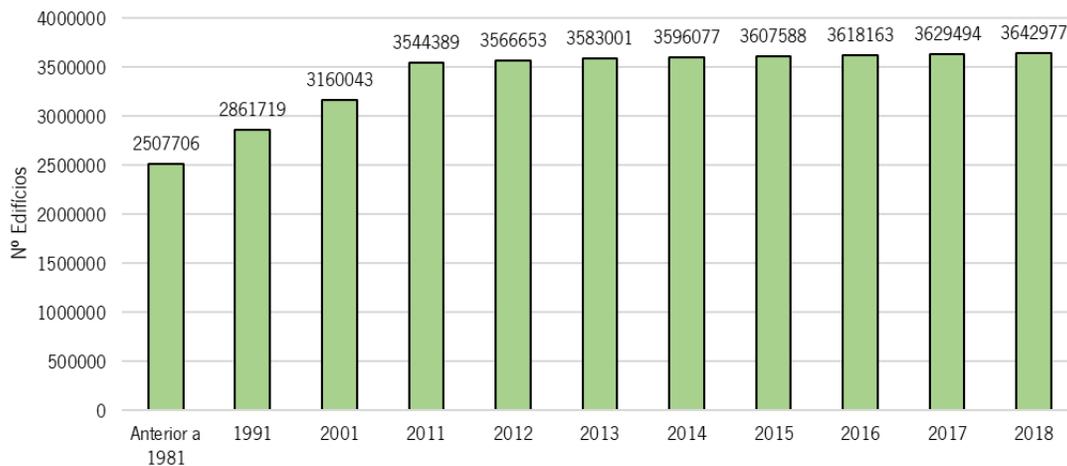


Figura 1 - Número total de edifícios licenciados ao longo dos anos (adaptado de INE, 2018b; PORDATA, 2018)

2.2.1 Consumos energéticos dos edifícios em Portugal

À semelhança da Europa, Portugal necessita urgentemente de reduzir os consumos energéticos nos edifícios, pois apesar deste setor não ser o maior consumidor de energia em Portugal, é um dos grandes responsáveis pelo aumento do consumo de energia (Comissão Europeia, 2008). Os consumos energéticos em Portugal em toneladas equivalentes de petróleo (tep) por setor encontram-se representados na Figura 2, onde é visível

que os transportes representam o setor que mais energia consome (42%), seguindo-se a indústria (26.9%) (PORDATA, 2018). Os edifícios residenciais são responsáveis por cerca de 16.2% da energia total consumida sendo que os principais gastos energéticos neste setor se devem ao aquecimento e arrefecimento das habitações (PORDATA, 2018).

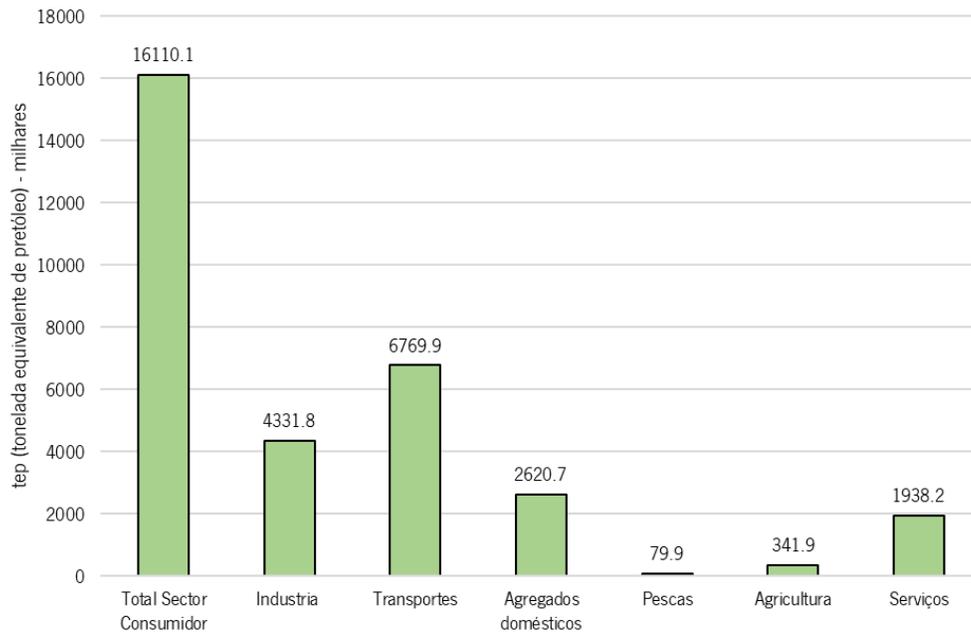


Figura 2 - Consumo de energia final total e por tipo de sector consumidor (adaptado de PORDATA, 2018)

Estes valores mais reduzidos dos consumos energéticos do setor residencial estão também associados ao facto de, em Portugal, cerca de 22% da população se encontrar numa situação de pobreza energética, não tendo por isso capacidade de aquecer e arrefecer as suas habitações ao longo do ano (Simões, Gregório & Seixas, 2016). Um agregado familiar é considerado energeticamente pobre caso necessitasse de gastar mais de 10% dos seus rendimentos em energia para aquecimento da habitação, aquecimento de águas, iluminação, etc. (Simões, Gregório & Seixas, 2016).

Simões, Gregório & Seixas (2016), concluíram que o distrito de Bragança é o que apresenta maiores níveis de pobreza energética, com cerca de 75% da população com idade superior a 65 anos, com a agravante de ser um dos distritos que possui condições mais extremas de temperatura tanto no inverno, como no verão. Por outro lado, Braga é o distrito com menores índices de pobreza energética pelo facto dos seus habitantes serem mais jovens e possuírem maiores rendimentos (Simões, Gregório & Seixas, 2016).

A eletricidade é a principal forma de energia utilizada no setor doméstico (Figura 3) tendo o seu consumo vindo a crescer todos os anos. Por outro lado, a lenha surge como a segunda fonte de energia mais utilizada, tendo vindo a decrescer nos últimos anos. A energia solar térmica já representa uma percentagem considerável do consumo total de energia no alojamento (INE, 2011).

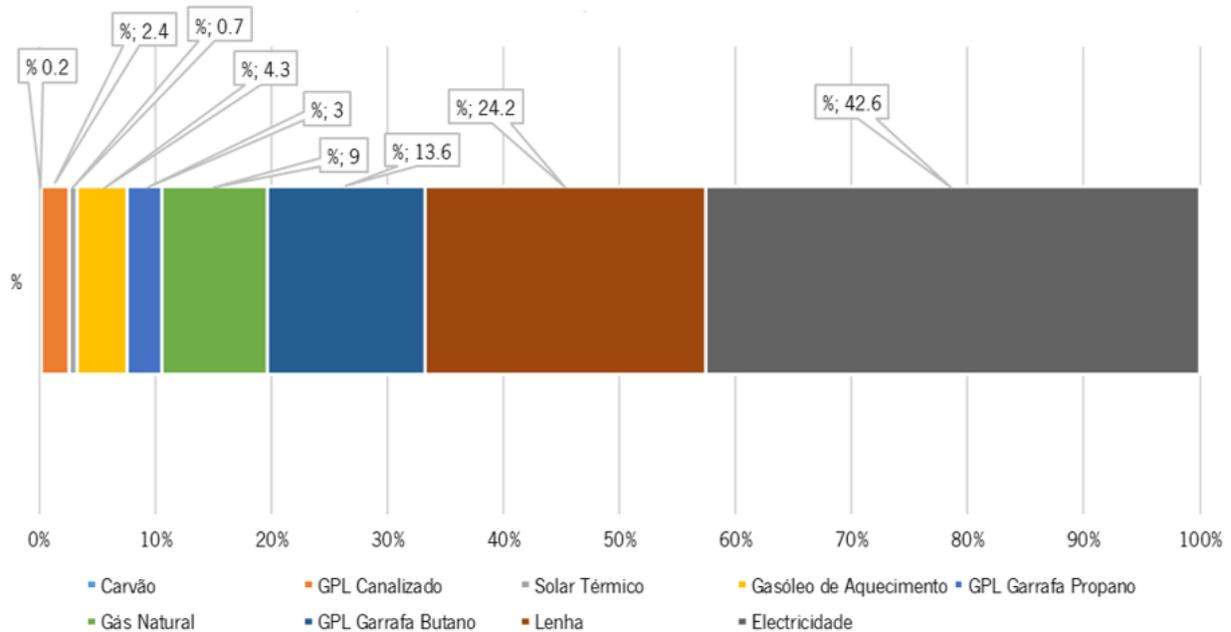


Figura 3 - Consumos totais por tipo de fonte energética (adaptado de (INE, 2011))

2.2.2 Desempenho energético dos edifícios

A maior parte do edificado Português (aproximadamente 78.5%) foi construído antes da entrada em vigor da primeira regulamentação no âmbito da eficiência energética, o RCCTE (Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios), publicada em 1990, e, por consequência, esta percentagem do parque edificado possui fraco desempenho energético, sendo por isso necessário reabilitar estes edifícios.

A 1 de julho de 2007 entrou em vigor a 1ª fase de implementação do Decreto-Lei 78/2006 - SCE (Sistema de Certificação Energética e da qualidade do ar interior nos edifícios), referente a todos os edifícios novos com mais de 1000 m². Mais tarde, a 1 de julho de 2008, entrou em vigor a 2ª fase de implementação desse Decreto-Lei, abrangendo também todos os edifícios novos com menos de 1000 m². Finalmente, a 1 de janeiro de 2009, entrou em vigor a 3ª fase de implementação do SCE, que se refere a todos os edifícios existentes (quando vendidos ou alugados), impondo assim que todos os edifícios novos ou existentes

deveriam ter um certificado energético para que desta forma fosse visível a situação efetiva de desempenho energético do (SCE, 2017).

O certificado energético de um edifício é um documento onde é apresentada a classificação do desempenho energético do mesmo numa escala de 8 níveis (A+, A, B, B-, C, D, E e F¹) sendo que a classificação A+ implica que o edifício em causa tem uma nota máxima de desempenho energético, enquanto a classificação F corresponde à nota mínima possível de desempenho energético (SCE, 2017).

Na Figura 4 é possível observar-se a evolução do desempenho energético de edifícios alvo de avaliação ao longo dos anos. Verifica-se que dos edifícios construídos antes de 1950, cerca de 75%, estão classificados com classificação C ou inferior. O panorama ao longo dos anos foi melhorando e, em 2013, apenas cerca de 35% dos edifícios construídos entre 2010 e 2014 apresentavam classificação C ou inferior (“DGEG”, 2013).

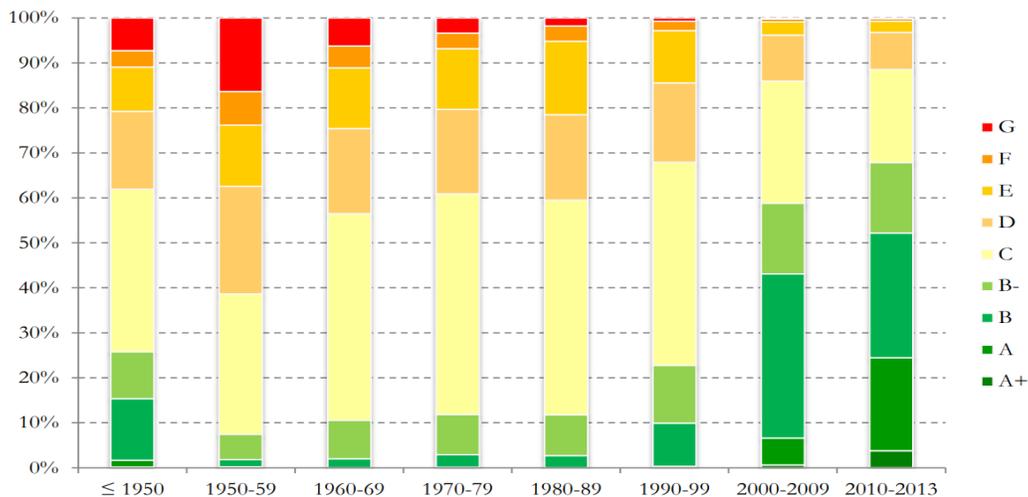


Figura 4 - Evolução no desempenho energético dos edifícios entre 1950 e 2013 (“DGEG”, 2013)

Com o objetivo de melhorar o panorama existente, deve, não só dar-se continuidade à construção de edifícios com desempenho energético elevado, mas também investir na renovação dos edifícios que possuam classes energéticas inadequadas conseguindo desta forma melhorar globalmente a classificação energética do edificado português e reduzir a pobreza energética das famílias, bem como também melhorar o seu conforto.

¹ Até à entrada em vigor do atual sistema de certificação energética em 2013 existia também a classe G.

2.2.3 Reabilitação de edifícios

A reabilitação de edifícios como estratégia para a melhoria da eficiência energética de edifícios, debruça-se em três grandes pilares: a cultura, o ambiente e a economia. A reabilitação de um edifício promove a vida útil do mesmo, aumenta a qualidade de vida dos seus ocupantes e foca-se também na implementação de boas técnicas construtivas que aumentem a sua eficiência energética. Em alternativa à demolição, é possível conservar a arquitetura do edifício reabilitado (Madeira, 2009). A preservação de um edifício existente também promove ações de cariz ambiental, no sentido em que não haverá grandes quantidades de materiais de demolição para tratamento, diminui as emissões de CO₂ e possibilita, sempre que possível, a utilização de materiais de reabilitação considerados materiais amigos do ambiente, não sendo este último ponto exclusivo da reabilitação (Prosil, 2017).

É importante também referir o impacto que a reabilitação de edifícios tem na economia. Um edifício após sofrer uma ação de reabilitação vê o seu valor de mercado aumentar. Tendo aumentado a sua eficiência energética, irá por consequência consumir menos energia para garantir as mesmas ou melhores condições de habitabilidade e conforto. Existirá uma redução dos custos de demolição, redução dos custos de estaleiro, redução das perturbações no meio urbano e uma redução nas quantidades de novos materiais usados. Em suma, os preços unitários de uma reabilitação podem ser mais elevados do que uma construção nova, mas o custo total da intervenção de reabilitação a longo prazo consegue ser menor do que uma construção nova (Gomes, 2011) e é possível recuperar o investimento mais rapidamente.

2.3 Qualidade do ambiente interior

A qualidade do ambiente interior pode ser avaliada segundo quatro componentes, a qualidade do ar interior, o conforto térmico, o conforto lumínico e o conforto acústico (CEN, 2007). No âmbito deste trabalho, será dada especial atenção às componentes qualidade do ar interior e conforto térmico.

O ser humano passa a maior parte do seu tempo em ambientes interiores, na sua habitação, no seu local de trabalho, ou em locais de lazer. Nestes espaços interiores existem variadas fontes de contaminação do ar, tais como, a ocupação humana e suas atividades, os materiais de construção e mobiliário, utilização de produtos de limpeza, entre outros (APA, 2016).

De forma a melhorar a qualidade do ar interior em edifícios, é necessário reduzir as fontes contaminantes no seu interior, mas também aplicar medidas de diluição destes mesmos contaminantes. O ajustamento das taxas de ventilação, a alteração dos hábitos dos ocupantes e a substituição de alguns materiais utilizados, são consideradas medidas de melhoria da qualidade do ar interior nos edifícios (APA, 2016).

Relativamente ao conforto térmico, as condições de conforto térmico variam de pessoa para pessoa, sendo difícil satisfazer todos os indivíduos situados no mesmo espaço (ASHRAE, 2017). A temperatura interna do corpo humano deve ser mantida a aproximadamente 37 °C, havendo, portanto, uma constante variação das trocas com o ambiente que o rodeia e da produção de energia através do metabolismo. É possível que num determinado edifício, não ocorra a situação de conforto geral, em que 100% dos seus ocupantes estão em situação de conforto térmico, uma vez que esta sensação vai depender de variados parâmetros físicos, biológicos e emocionais dos ocupantes e de situações de desconforto térmico local (Silva, 2011b).

A melhoria das condições de conforto térmico dos ocupantes de um edifício, é muitas vezes efetuado com o auxílio de um sistema de climatização instalado no edifício, bem como a escolha dos materiais que irão consequentemente influenciar a sua inércia térmica. A ventilação natural e a orientação dos vãos envidraçados também são aspetos a considerar, aquando da melhoria das condições de conforto térmico dos ocupantes de um edifício (Moita, 2010).

2.3 Principais patologias em edifícios

O Homem passa grande parte do seu tempo no interior dos edifícios (cerca de 90%), sendo por isso de extrema importância garantir um ambiente saudável e confortável aos ocupantes dos edifícios (Klepeis *et al.*, 2001).

Na conceção ou reabilitação de um edifício é de extrema importância garantir que, sejam quais forem as condições climatéricas no exterior, se consiga atingir níveis satisfatórios de conforto térmico e qualidade do ar interior para que desta forma os seus ocupantes não sejam afetados física e psicologicamente (Silva, 2011a).

As patologias de edifícios podem ser divididas em Patologias estruturais e não estruturais, estéticas, funcionais, podendo ser reversíveis ou irreversíveis, tal como apresentado na Tabela 1. Os problemas energéticos ou de baixa qualidade do ambiente interior dos edifícios podem ser classificados como:

problemas primários, consequência de uma má execução das técnicas construtivas ou inexistência de materiais adequados, sendo estas patologias relevadas pouco tempo após a conclusão do edifício e; problemas secundários que se refletem ao longo da vida útil do edifício, neste caso, estes problemas podem também dever-se às causas referidas, mas também ao facto dos materiais outrora utilizados na construção do edifício já se terem degradado com o tempo e as ações climáticas (Douglas & Ransom, 2013). A má utilização do edifício por parte dos seus ocupantes pode também ter um impacto significativo na sua conservação e desempenho energético (Douglas & Ransom, 2013).

Tabela 1 - Tipos e exemplos de patologias (adaptado de Douglas & Ransom, 2013)

| Tipo de patologia | Causas |
|--------------------------|--|
| Patologia estrutural | - Fissuras - Problemas do solo no local de implantação do edifício |
| Patologia não estrutural | - Fissuras no reboco - Bolhas ou descamação da pintura - Humidade |
| Patologia estética | - Fendilhação no betão - Descamação da pintura |
| Patologia funcional | - Portas e janelas com mau funcionamento - Zonas dos telhados danificadas |
| Patologia reversível | - Descamação da pintura |
| Patologia irreversível | - Excesso de deformação de um elemento estrutural |

2.3.1 Deterioração do revestimento exterior

Os revestimentos exteriores servem essencialmente para proteger as paredes da envolvente exterior do edifício de agentes químicos, impactos ou ação natural, nomeadamente da chuva. Uma das funções dos revestimentos exteriores é também melhorar a estética de um edifício sendo, portanto, fundamental neste aspeto que se realizem intervenções de manutenção a estes revestimentos.

Existe uma vasta lista de tipos de revestimentos exteriores utilizados nos edifícios, nomeadamente o revestimento em “pastilha” cerâmica, revestimento em monomassa, revestimento em ladrilhos cerâmicos, sistemas compósitos de isolamento térmico pelo exterior (ETICS), revestimento em placas de xisto, revestimento em placas de granito, entre outros (“PATORREB”, 2015).

Os principais problemas que afetam o revestimento exterior de um edifício são a descolagem do material (A), as manchas de eflorescências (B) e a fissuração (C), tal como representado na Figura 5 (“PATORREB”, 2015).



Figura 5 - Patologias mais frequentes no revestimento exterior dos edifícios (descolagem do material (A), manchas de eflorescências (B) e fissuração (C)) (Aecweb, n.d.; Oitomeio, 2017; Antunes G.,2010)

2.3.3 Patologias em coberturas

A função das coberturas é de proteger o interior dos edifícios das ações do ambiente exterior (como a chuva, o vento, a neve, a radiação solar, entre outros). Este elemento construtivo proporciona também conforto térmico e acústico aos ocupantes do edifício e tem um papel fundamental na captação das águas pluviais (Cruz, 2009). Os principais materiais utilizados no revestimento das coberturas são as telhas, em coberturas inclinadas e telas betuminosas em coberturas planas. Em outros casos pode também utilizar-se chapas de zinco ou pedra (Cruz, 2009). Na Tabela 2 apresentam-se as principais patologias referentes às coberturas planas, em que o material usado são as telas betuminosas. Nas coberturas inclinadas em que o material mais utilizado é a telha cerâmica, as patologias mais frequentes são as fraturas, acumulação de sujidade e deterioração por exposição às ações climáticas (Cruz, 2009).

Tabela 2 - Patologias em coberturas planas (adaptado de Cruz, 2009)

| Tipo de patologia | Sintomas | Causas mais prováveis |
|--------------------------|-----------------------|--|
| Fissuração | Fissuras | - Ações transmitidas pelas camadas subjacentes ou sobrejacentes - Movimentos diferenciais - Contração ou expansão - Incompatibilidade de materiais - Ação do calor |
| Perfuração | Perfurações | - Cargas pontuais - Fixação de objetos - Peças de fixação |
| Pregas | Formação de pregas | - Ação do calor - Ação dos ultravioletas |
| Empolamentos | Sobrelevações da tela | - Formação de bolsas de ar e vapor de água sob pressão |
| Arrancamento | Levantamento da tela | - Proteção pesada diminuta - Sistema de colagem - Insuficiente número de peças de amarração |

2.3.4 Patologias em pavimentos

Os pavimentos têm como principal propósito a divisão entre andares de um edifício, ou com zonas de garagens e no caso de pavimentos térreos, estes atuam como elementos de separação com o terreno. Este elemento construtivo serve também de suporte a todos os ocupantes e bens materiais inseridos no edifício. As patologias não estruturais mais frequentes em pavimentos estão relacionadas com os revestimentos dos mesmos.

Os materiais mais comuns utilizados como revestimento para pavimentos são os revestimentos em madeira, os revestimentos cerâmicos e as pedras, podendo em certos casos utilizar-se microcimentos, betão decorativo ou revestimentos epóxidos (Cruz, 2009). Nos pavimentos em madeira geralmente ocorrem problemas relacionados com a ação da água, da radiação solar e da temperatura. A madeira é um material em que facilmente ocorre o fenómeno da retração, pelo que se o seu teor em água aumentar a madeira aumenta de tamanho e se diminuir contrai, provocando fendilhação, empolamentos e empenamentos (Cruz, 2009).

Por outro lado, a radiação solar direta em pavimentos em madeira pode também ser nociva pois pode a longo prazo degradar a madeira, originar abertura de juntas entre os elementos de madeira (Figura 6), ou até mesmo fissurar. A radiação solar proporciona aumentos de temperatura na superfície do pavimento e pode ainda deteriorar os produtos de acabamento utilizados (Santos, 2016).



Figura 6 - Abertura de juntas entre os elementos de madeira (NFCA, n.d.)

Em relação aos pavimentos cerâmicos e pétreos as suas patologias são geralmente semelhantes. Na Tabela 3 são apresentadas as principais patologias para este tipo de pavimento.

Tabela 3 - Patologias em pavimentos cerâmicos e pétreos (adaptado de Cruz, 2009)

| Tipo de patologia | Sintomas | Causas mais prováveis |
|--------------------------|----------------------------|--|
| Deslocamentos | Perda de aderência | - Movimentos diferenciais - Aderência insuficiente entre camadas de revestimento - Falta de juntas elásticas no contorno do revestimento |
| Fissuração | Fissuras | - Fendilhação do suporte - Movimentos diferenciais - Contração ou expansão - Choque violento |
| Riscos/desgastes | Desaparecimento do vidrada | - Abertura de poros na superfície - Desgaste das zonas de maior circulação - Ação gelo-degelo (em pavimentos exteriores) |
| Eflorescências | Manchas esbranquiçadas | - Cristalização de sais a superfície dos ladrilhos |

2.4 Soluções de reabilitação energética e da qualidade do ambiente interior

Identificadas as patologias mais comuns nos edifícios é necessário então proceder à reabilitação dessas situações indesejáveis que colocam em causa o conforto dos ocupantes e o funcionamento dos edifícios. Em seguida irão ser apresentadas técnicas e soluções de reabilitação dos edifícios para combater as principais patologias que ocorrem nos edifícios, mas também aumentar o seu desempenho energético.

Uma vez que a maior parte do edificado Português foi construído antes da entrada em vigor da primeira regulamentação térmica nacional em 1991, apresenta um fraco desempenho energético e um elevado consumo de energia para aquecimento e arrefecimento. Esta situação poderá ser revertida caso se apliquem soluções de reabilitação adequadas, tais como, aumentar o isolamento térmico dos elementos da envolvente exterior, substituição dos vãos envidraçados por sistemas com melhor desempenho energético, o uso de fontes de energia renováveis, promoção de uma ventilação adequada, entre outros.

2.4.1 Isolamento térmico nas paredes exteriores

O isolamento térmico aplicado nas paredes exteriores de um edifício reduz significativamente as trocas de calor entre o interior do edifício e o exterior, conseguindo desta forma reduzir os consumos energéticos para aquecimento ou arrefecimento ao longo do ano. O coeficiente de transmissão térmica (U) de um elemento, em ($W/m^2 \cdot ^\circ C$), é calculado em função da resistência térmica (R), em ($m^2 \cdot ^\circ C/W$), de cada material constituinte desse mesmo elemento. Quanto menor for o valor de U menor serão as trocas de calor/energia do interior do edifício com o exterior (Silva, 2011a).

O reforço ou aplicação do isolamento térmico de paredes pode ser realizado pelo interior, pelo exterior ou ser aplicado na caixa de ar de paredes duplas.

Isolamento térmico aplicado pelo interior

No isolamento térmico colocado pelo interior utilizam-se habitualmente painéis de isolamento pré-fabricados, ou procede-se à execução de uma contra-fachada no lado interior da parede a reabilitar. Os painéis isolantes pré-fabricados, constituídos por um paramento de gesso cartonado e uma camada de isolamento térmico de poliestireno expandido (EPS) ou extrudido (XPS), são colocados diretamente na parede a reabilitar ou fixados a uma estrutura de apoio secundária (“ADENE”, 2013).

De entre as soluções que existem, destacam-se as seguintes soluções possíveis de adotar, na execução de uma contra-fachada, um pano de alvenaria leve (Figura 7A) ou placas de gesso cartonado (Figura 7B) em que o isolamento térmico é colocado de forma a não entrar em contacto com a placa de gesso, através da criação de uma caixa de ar entre as placas de gesso, através da criação de uma caixa de ar entre as placas de gesso cartonado (“ADENE”, 2013).

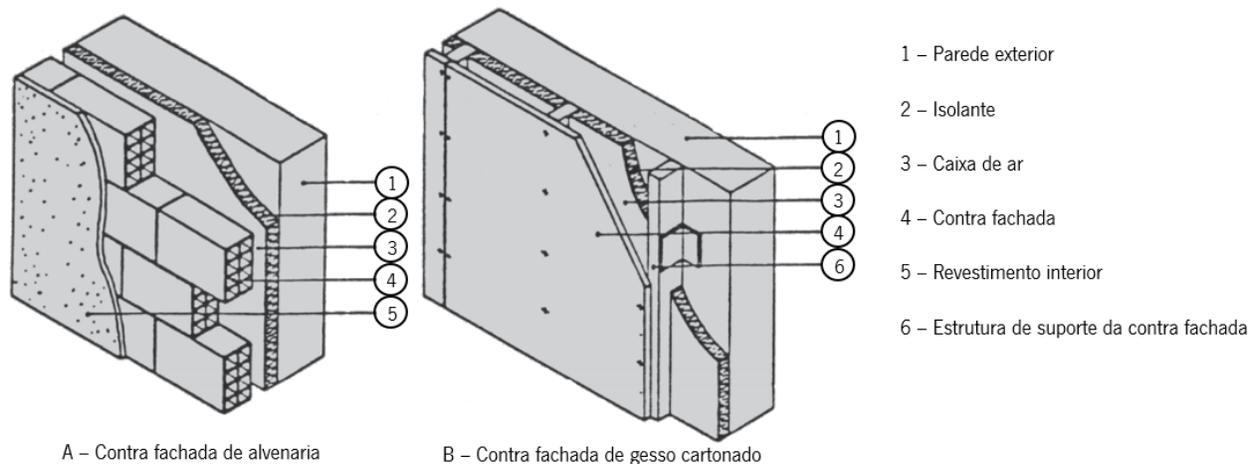


Figura 7 – Aplicação de isolamento pelo interior de paredes – execução de contra-fachada de alvenaria e contra-fachada de gesso cartonado (adaptado de “ADENE”, 2013)

Isolamento térmico colocado na caixa-de-ar

Caso se trate de uma parede dupla é possível recorrer à aplicação de isolamento térmico na caixa de ar da parede (“ADENE”, 2013). Assim, é possível reduzir os trabalhos de demolição e reposição dos panos de alvenaria, sendo apenas necessário efetuar os furos necessários para a introdução do isolamento térmico (“ADENE”, 2013). Nesta solução utilizam-se materiais isolantes soltos ou espumas de poliuretano (Figura 8). As principais limitações deste tipo de solução são as seguintes: espessura reduzida na caixa de ar; existência de detritos no interior da caixa de ar; possível não homogeneidade da aplicação do material isolante; risco de criação de pontes térmicas (“ADENE”, 2013).



Figura 8 - Injeção de espuma de poliuretano na caixa de ar de uma parede dupla (Mundipol, n.d.)

Isolamento térmico colocado no exterior

O isolamento térmico colocado pelo exterior apresenta diversas vantagens em relação à aplicação do isolamento pelo interior, pelo que desde que não existam limitações deverá, sempre que possível, optar-se por esta solução. Existem três tipos de formas de aplicação do isolamento térmico pelo exterior, revestimento independente com interposição de um isolamento térmico no espaço de ar, sistemas compósitos de isolamento térmico pelo exterior (Sistema ETICS) e revestimentos isolantes pré-fabricados (“ADENE”, 2013). Na Tabela 4 são apresentadas as vantagens e inconvenientes da aplicação do isolamento colocado pelo exterior em relação ao isolamento colocado pelo interior (“ADENE”, 2013).

Tabela 4 - Vantagens e inconvenientes do isolamento térmico colocado pelo exterior em relação ao isolamento térmico colocado pelo interior (adaptado de Silva, 2011b)

| Vantagens | Inconvenientes |
|--|--|
| - Isolamento térmico mais eficiente | - Constrangimentos arquitetónicos |
| - Proteção das paredes contra agentes atmosféricos | - Constrangimentos de ordem técnica |
| - Ausência de descontinuidades na camada isolamento | - Maior vulnerabilidade da parede ao choque, sobretudo no rés-do-chão |
| - Tratamento de pontes térmicas e redução dos riscos de condensação | - Custo em regra mais elevado (aproximadamente o dobro) |
| - Conservação da inércia térmica de paredes | - Risco de fendilhação dos revestimentos (em soluções com revestimentos contínuos) |
| - Manutenção das dimensões dos espaços interiores | |
| - Menores riscos de incendio e de toxicidade | |
| - Manutenção da ocupação dos edifícios durante as obras | |
| - Dispensa de interrupções nas instalações interiores e de trabalhos de reposição de acabamentos | |
| - Eventual melhoria do aspeto exterior dos edifícios | |

Revestimento independente com interposição de um isolamento térmico na caixa de ar

Este tipo de solução é normalmente designado por fachada ventilada, constituída por um revestimento exterior independente, fixado à parede por uma estrutura secundária (Figura 9). Desta forma é possível proteger o isolamento térmico, criando uma caixa de ar entre a parede e o revestimento exterior. O revestimento exterior pode ser composto por placas metálicas, de material plástico, ou pedra (“ADENE”, 2013).

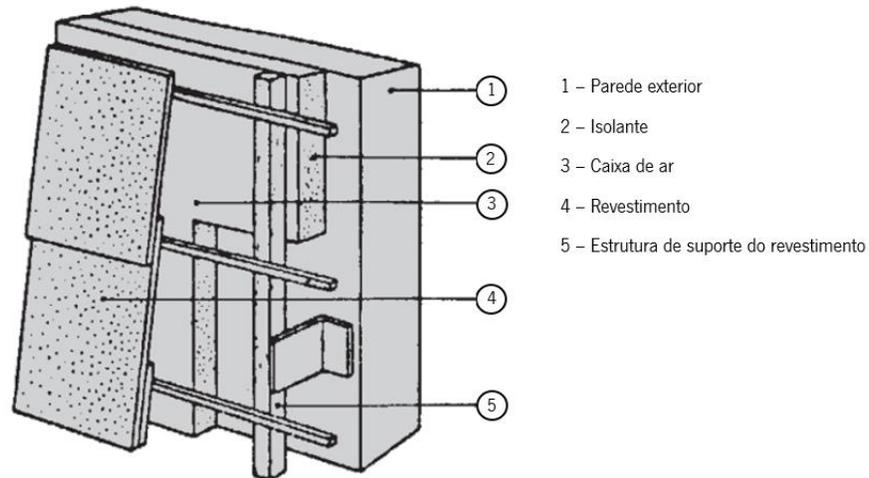


Figura 9 - Revestimento independente com isolante térmico na caixa-de-ar (adaptado de “ADENE”, 2013)

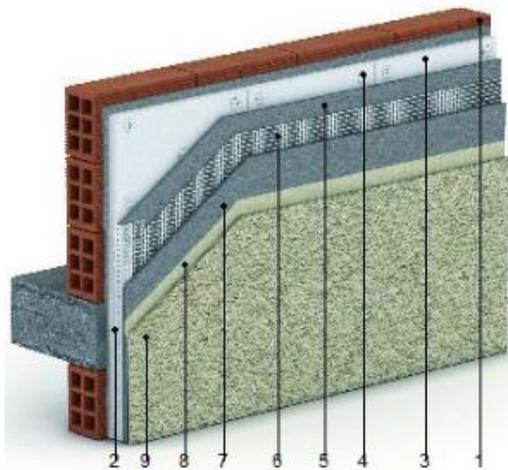
Sistemas compostos de isolamento térmico pelo exterior (Sistema ETICS)

Na aplicação do sistema ETICS (Figura 10) utilizam-se placas de isolamento térmico que são coladas ou fixadas à parede exterior. Numa fase posterior, é colocado um revestimento exterior contínuo armado que serve para conferir proteção contra os agentes atmosféricos. Existem dois tipos de ETICS que diferem na espessura do revestimento aplicado: os sistemas com revestimento espesso e os sistemas com revestimento delgado (“ADENE”, 2013).



Figura 10 - Aspeto da realização de um sistema ETICS (Progepom, n.d.)

Nos sistemas ETICS com revestimento espesso utilizam-se placas de polistireno expandido moldado (EPS) ou lã mineral (MW) como isolamento térmico e como revestimento final usa-se um ligante mineral armado com uma rede metálica (Figura 11) (“ADENE”, 2013).



- 1 – Suporte
- 2 – Perfil de canto
- 3 – Isolamento
- 4 – Fixação mecânica
- 5 – Argamassa base
- 6 – Malha de reforço
- 7 – Argamassa base
- 8 – Primário
- 9 – Argamassa decorativa

Figura 11 - Sistema ETICS com revestimento espesso (Gerador de preços, n.d.)

No sistema ETICS com revestimento delgado (Figura 12) é usado um revestimento ligante sintético ou misto armado com uma rede de fibra de vidro com o objetivo de aumentar a sua resistência mecânica em zonas de maior risco, tais como paredes localizadas em pisos térreos e de acesso público (“ADENE”, 2013).

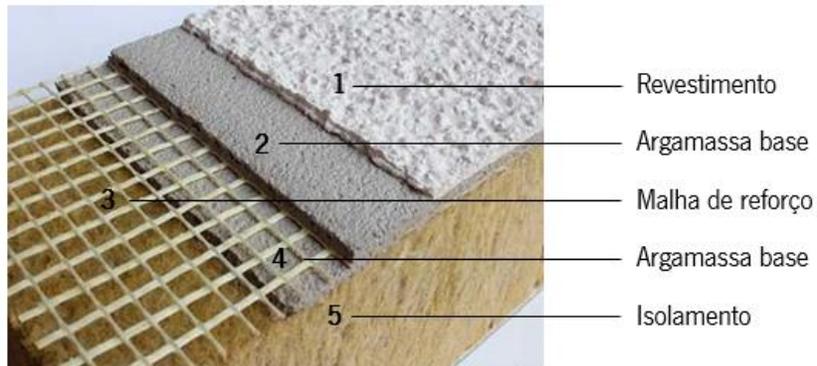


Figura 12 - Sistema ETICS com revestimento delgado (Globalescolha, n.d.)

Revestimentos isolantes pré-fabricados

Este tipo de revestimento é composto por elementos pré-fabricados, um material isolante em placas (poliestireno expandido) e um revestimento metálico, mineral ou orgânico (Figura 13). Visto tratar-se de um elemento pré-fabricado a colocação em obra é feita numa única operação e dispensa qualquer tipo de estrutura de fixação intermédia (“ADENE”, 2013).

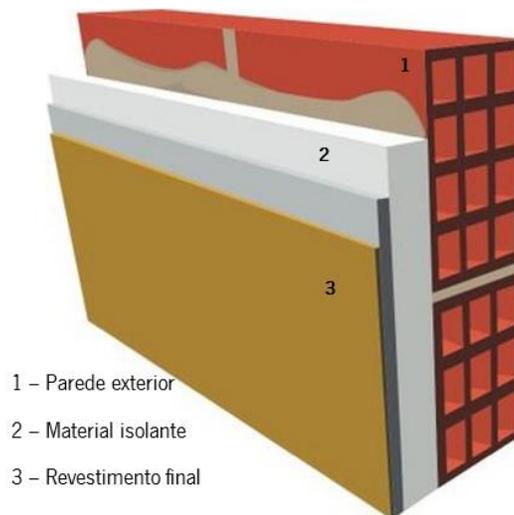


Figura 13 - Revestimento isolante pré-fabricado (Condotelecon, n.d.)

2.4.2 Vãos envidraçados

Uma grande parte das perdas de calor que ocorrem nos edifícios são devidas aos vãos envidraçados de baixa eficiência, tendo como consequência um aumento do consumo de energia para aquecimento ambiente do edifício. Reabilitar este elemento vem reforçar o isolamento térmico de um edifício, mas também reduzir a probabilidade de ocorrência de infiltrações de ar não-controladas, evitar condensações na face interior dos envidraçados, melhorar a ventilação natural e também melhorar o conforto acústico (“ADENE”, 2013; “ADENE”, 2016b).

As principais medidas de reabilitação de vãos envidraçados são (“ADENE”, 2016b):

- Alteração do tipo de vidro, de vidro simples para vidro duplo;
- Alteração do tipo de caixilharia para uma caixilharia com melhor eficiência energética, por exemplo substituição de caixilharia de alumínio por uma caixilharia de alumínio com corte térmico ou por uma caixilharia em PVC;
- Colocação de uma caixilharia secundária pelo interior (nos casos em que a caixilharia exterior não possa ser alterada), ou pelo exterior;
- Inspeção e recolocação de borrachas vedantes nas partes móveis das janelas e nas ligações com as estruturas de suporte.

As medidas de prevenção aplicáveis pelos ocupantes do edifício são as seguintes (“ADENE”, 2016b):

- Abertura das janelas para ventilação (no verão, em especial durante a noite, quando a temperatura exterior desce abaixo da do ar interior, e no inverno, quando se dá a situação inversa);
- Abertura completa das janelas para ventilação por períodos curtos;
- Oclusão dos vãos nos períodos noturnos de inverno, ou quando se verificarem ganhos solares excessivos no verão.

2.4.3 Coberturas

A cobertura de um edifício é uma das principais prioridades quando se efetua uma intervenção de eficiência energética num edifício, pois é o elemento construtivo que mais está sujeito a elevadas amplitudes térmicas e é responsável por cerca de 30% das perdas de calor de uma habitação (“ADENE”, 2016a).

Por norma, as intervenções efetuadas nas coberturas têm como principal objetivo a resolução de problemas de impermeabilização, e poder-se-á facilmente alargar a intervenção e fazer a aplicação de um isolamento térmico dividindo ligeiramente os custos de operação entre estas duas intervenções (“ADENE”, 2013). Uma cobertura eficiente tem como principais objetivos (“ADENE”, 2016a):

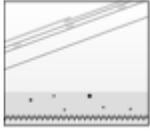
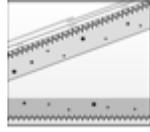
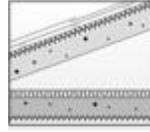
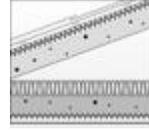
- Melhor conservação da temperatura interior da habitação;
- Redução da necessidade de utilização de equipamentos para aquecer e arrefecer os espaços;
- Diminuição do aparecimento de patologias, tais como: condensações, fungos, bolores e aparecimento de manchas;
- Maior durabilidade do edifício.

Coberturas inclinadas

O tipo de cobertura mais utilizada em Portugal é a cobertura inclinada com revestimento de telhas cerâmicas ou telhas de betão. Na Tabela 5 é possível observar a evolução das técnicas construtivas destas coberturas bem como a aplicação do isolamento térmico (“ADENE”, 2016a).

Caso o desvão não seja habitável o isolamento deve ser colocado na esteira horizontal, por outro lado, caso o desvão seja habitável o isolamento é colocado na vertente da cobertura (Figura 14) (“ADENE”, 2016a).

Tabela 5 - Evolução ao longo dos anos das técnicas construtivas das coberturas inclinadas (adaptado de “ADENE”, 2013)

| *Antes de 1960 | *1960-1990 | *1990-2005 | *2006-2013 | *Após 2013 |
|---|---|---|--|---|
|  |  |  |  |  |
| Cobertura em desvão com estrutura de madeira | Cobertura em desvão com estrutura de betão | Cobertura em desvão com estrutura de betão | Cobertura em desvão com estrutura de betão com isolamento na esteira | Cobertura em desvão com estrutura de betão com isolamento na esteira |
| Sem isolamento | Sem isolamento | Sem isolamento | 60 a 70 mm isolamento | 70 a 80 mm isolamento |

* Ano de construção

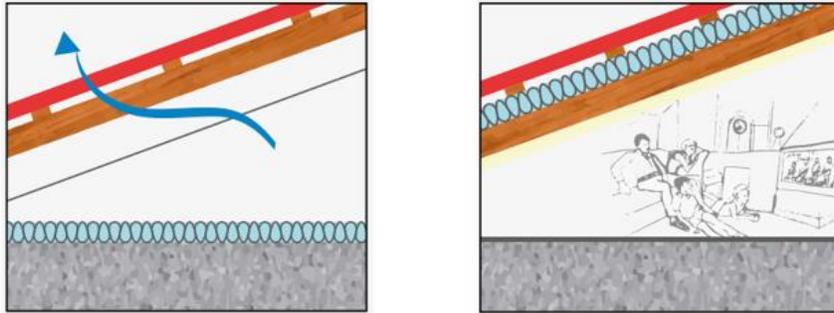


Figura 14 - Colocação de isolamento na esteira de um desvão não habitável, à esquerda, e na vertente de um desvão habitável, à direita (“PATORREB”, 2015)

Coberturas horizontais

Nas coberturas horizontais poder-se-á colocar o isolamento térmico de três maneiras diferentes, dependendo da sua posição, nomeadamente, isolamento térmico superior, isolamento térmico intermédio e isolamento térmico inferior. Antes de efetuar qualquer tipo de reabilitação da cobertura é necessário detetar e corrigir quaisquer anomalias devidas a infiltrações, condensações, fendilhações, descolamentos ou outras degradações. Caso se encontre água neste tipo de coberturas é imprescindível que se proceda à secagem total dos elementos afetados antes de efetuar qualquer tipo de trabalho de reabilitação (“ADENE”, 2013). Nas coberturas horizontais em que o isolamento térmico é colocado em posição superior há duas soluções possíveis: a cobertura invertida (Figura 15) e a cobertura com isolamento térmico suporte de impermeabilização (Figura 16). A cobertura invertida permite proteger a cobertura de grandes amplitudes

térmicas, aumentando desta forma a sua vida útil. Neste caso, quando se efetua a sua aplicação é possível aproveitar a impermeabilização já existente, sendo a cobertura invertida a solução mais aconselhável em relação à cobertura com isolamento térmico suporte de impermeabilização (“ADENE”, 2013).

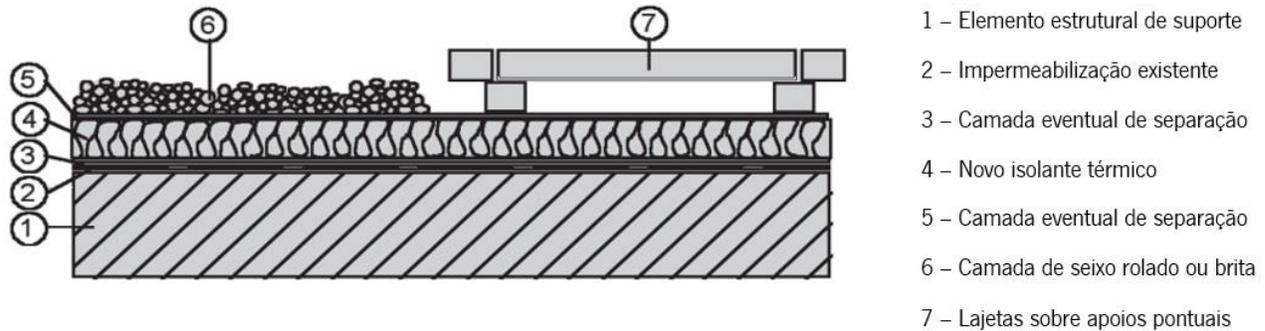


Figura 15 - Cobertura invertida (adaptado de “ADENE”, 2013)

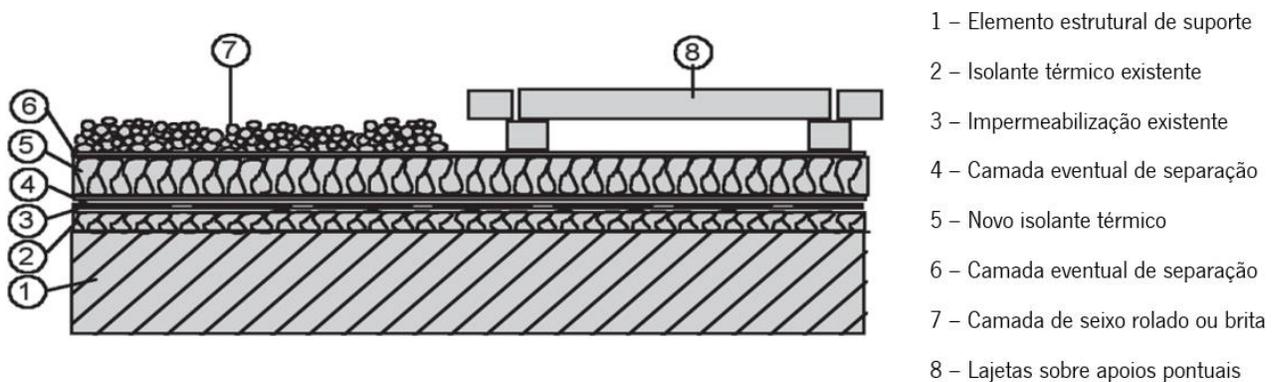


Figura 16 - Cobertura com isolamento suporte de impermeabilização (adaptado de “ADENE”, 2013)

Quando se coloca o isolamento térmico em posição intermédia, ou seja, entre a esteira horizontal e a camada de forma, é necessário haver sempre uma reconstrução total das camadas superiores da laje, precisando assim de cuidados especiais de conceção e execução para evitar que ocorram fenómenos de choque térmico ou problemas futuros de degradação. Este tipo de solução não é a mais recomendada (“ADENE”, 2013).

Colocar o isolamento térmico em posição inferior à laje de esteira, é a solução menos recomendada pelo que apenas deverá ser tida em consideração quando integrado num teto falso desligado da esteira e, ainda assim, pode não proteger termicamente a estrutura (“ADENE”, 2013. Nunca se deverá colocar o isolamento diretamente na face inferior da laje pois é muito menos eficiente e aumenta o risco de deformações e degradação (“ADENE”, 2013).

2.4.4 Pavimentos

As intervenções de reabilitação em pavimentos com o objetivo de efetuar um reforço de isolamento térmico são fundamentais quando estes pavimentos se encontram em contacto direto com o exterior ou com espaços interiores como garagens ou caves não habitáveis. Para este tipo de reforço do isolamento térmico existem três opções a seguir, em função da localização do isolamento (“ADENE”, 2013):

- Isolamento térmico inferior (Figura 17);
- Isolamento térmico intermédio (Figura 18);
- Isolamento térmico superior (Figura 19).

As soluções de isolamento térmico inferior são as mais eficientes termicamente e mais económicas e são também as soluções de mais fácil e rápida aplicação desde que o espaço subjacente ao pavimento seja acessível. Já as soluções de isolamento térmico superior são mais dispendiosas e tem o inconveniente adicional de reduzir o pé direito do espaço a reabilitar.

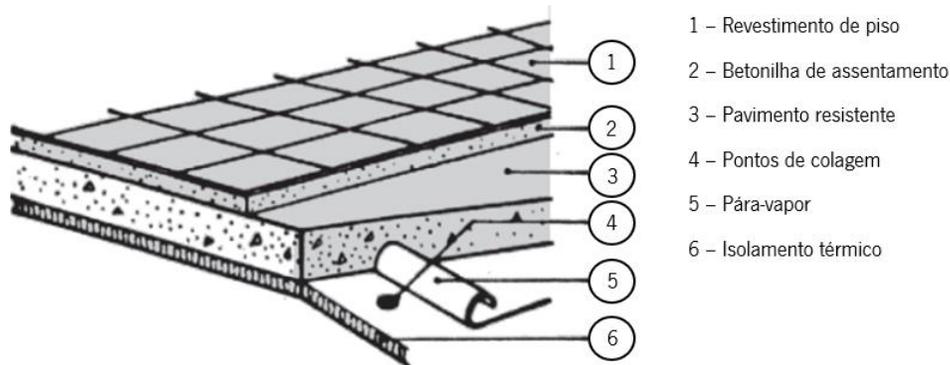


Figura 17 - Isolamento térmico inferior (adaptado de “ADENE”, 2013)

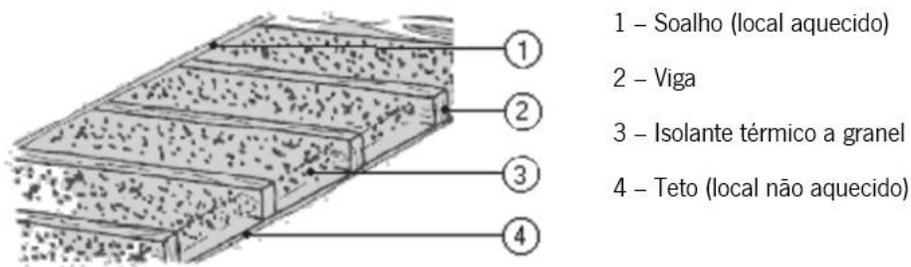


Figura 18 - Isolamento térmico intermédio (adaptado de “ADENE”, 2013)

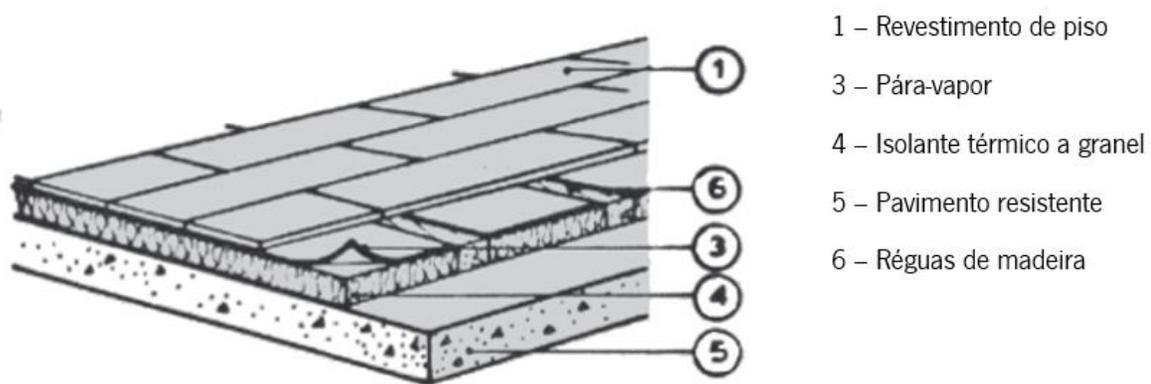


Figura 19 - Isolamento térmico superior (adaptado de "ADENE", 2013)

CAPÍTULO 3 – APRESENTAÇÃO DO CASO DE ESTUDO E METODOLOGIA

3.1 Metodologia

Neste capítulo é apresentado o edifício em estudo e o programa utilizado para avaliar o desempenho energético do mesmo, antes e depois das intervenções de reabilitação. Assim, foi possível entender qual o desempenho energético do edifício original, e quais as melhorias face às intervenções de reabilitação, conseguindo desta forma estudar a viabilidade da intervenção e também efetuar um estudo económico da mesma.

Na simulação do edifício foram estudadas diferentes soluções construtivas para a reabilitação das paredes exteriores, cobertura e vãos envidraçados. Foi também avaliada a qualidade do ar interior através da metodologia descrita na norma EN 16798-1 (CEN, 2019). Para a modelação e simulação do edifício foi utilizado o programa de simulação dinâmica *DesignBuilder*, que será apresentado e brevemente explicada a sua utilização no subcapítulo 3.3.

3.2 Apresentação do caso de estudo

O caso de estudo em análise é uma habitação unifamiliar, construída em 1990, localizada na cidade de Viana do Castelo. Na Figura 20 apresenta-se uma imagem satélite do edifício. A escolha do edifício em estudo teve principalmente a sua data de construção em consideração, que é representativa de cerca de 78.5% dos edifícios em Portugal (PORDATA, 2011; INE, 2018b). O edifício selecionado encontra-se a uma altitude de 26 metros e a uma distância à costa de 4 quilómetros.



Figura 20 - Imagem satélite do edifício em estudo

3.2.1 Características geométricas

O edifício é constituído por uma cave, onde se localiza a lavandaria e os arrumos (Figura 21), rés do chão (R/C), com uma sala, instalação sanitária (IS), escritório, cozinha e garagem (Figura 22), e 1º andar, onde existe uma instalação sanitária comum, três quartos, um deles com instalação sanitária privativa e um escritório (Figura 23). Na Figura 24 está representada a planta da cobertura, plana, do edifício. Esta construção tem uma área de implantação de 146 m², uma área bruta de construção de 376 m² e conta com uma área útil de 122 m².

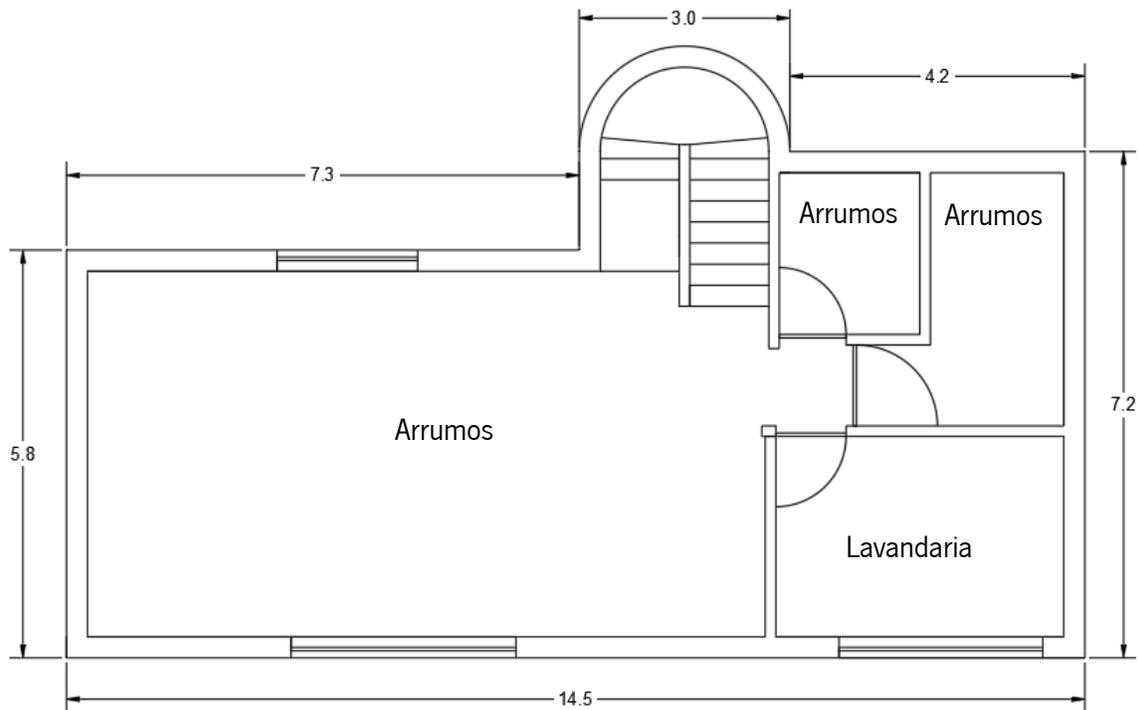


Figura 21 - Planta da cave (dimensões em metros)

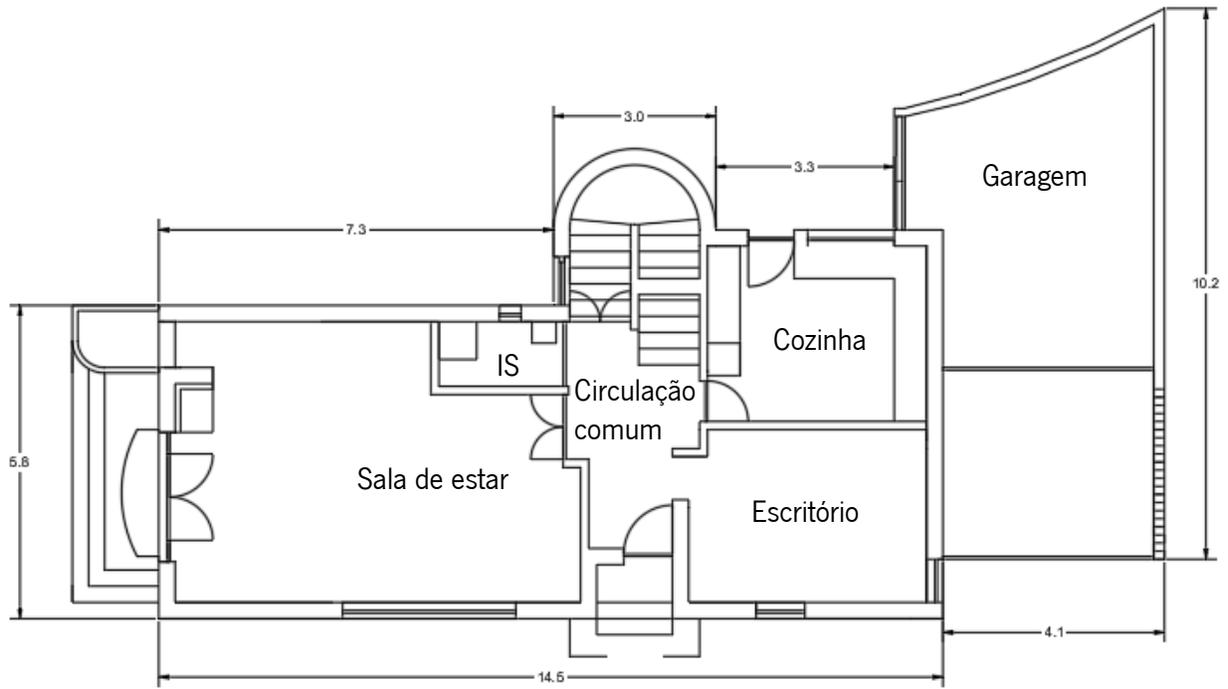


Figura 22 - Planta do rés do chão (dimensões em metros)

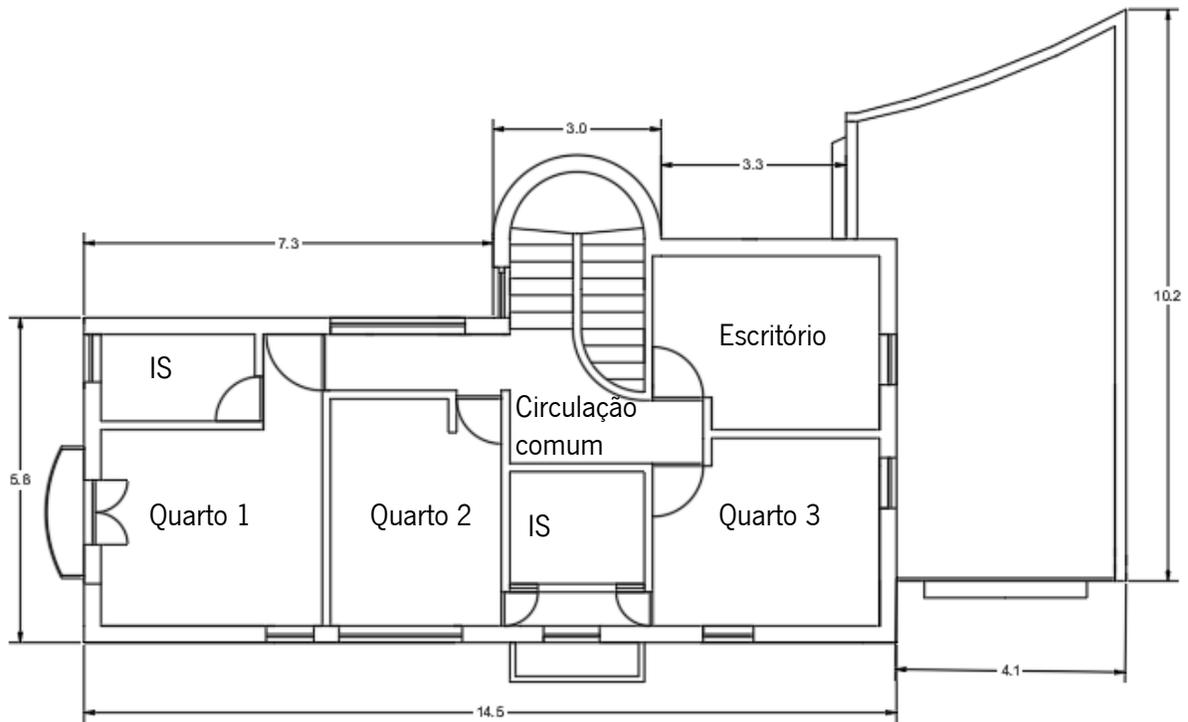


Figura 23 - Planta do 1º andar (dimensões em metros)

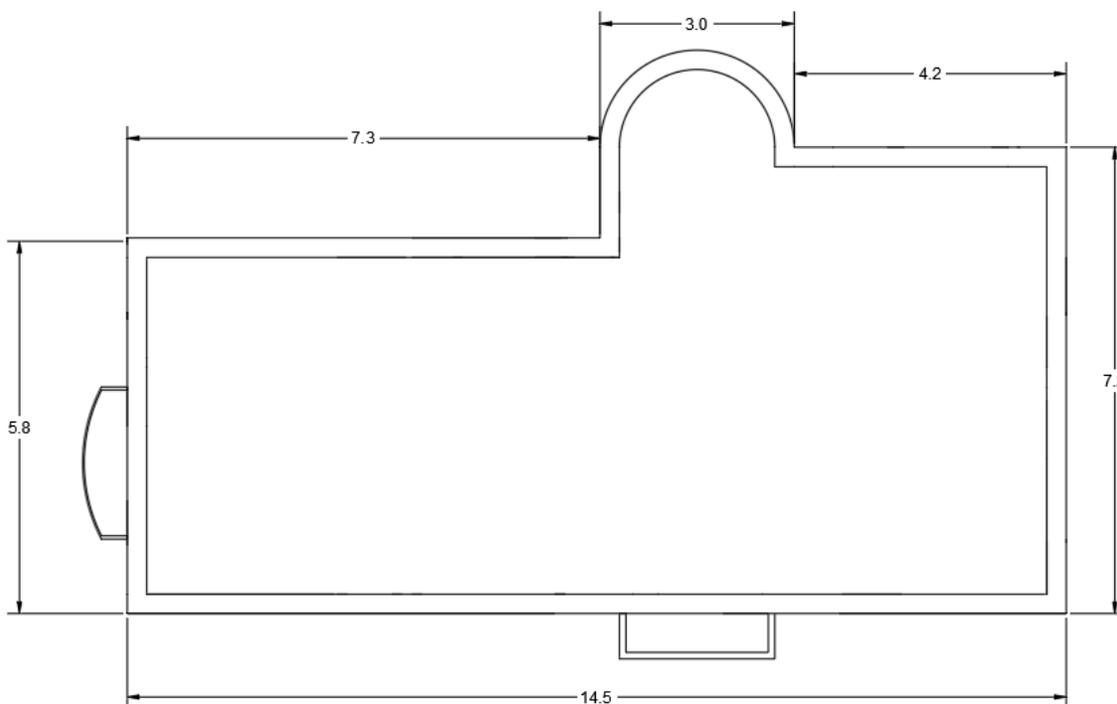


Figura 24 - Planta da cobertura (dimensões em metros)

3.2.2 Características construtivas

Neste subcapítulo são apresentadas as soluções construtivas do caso de estudo, nomeadamente das paredes exteriores e interiores, dos pavimentos, da cobertura e dos vãos envidraçados.

Paredes exteriores e interiores

As paredes exteriores (Figura 25), rebocadas em ambos os lados (1) e (6), são duplas e possuem um pano de alvenaria de tijolo cerâmico furado de 15 cm (1), uma caixa de ar de 5 cm (3), isolamento térmico, XPS, com 3 cm de espessura (4) e um pano de alvenaria de tijolo cerâmico furado de 11 cm (5).

A parede interior (Figura 26), rebocada em ambos os lados (1) e (3), é simples, constituída por um pano de alvenaria de tijolo cerâmico furado de 11 cm (2). As paredes divisórias são também paredes simples de alvenaria de tijolo cerâmico furado de 11cm, rebocadas em ambos os lados.

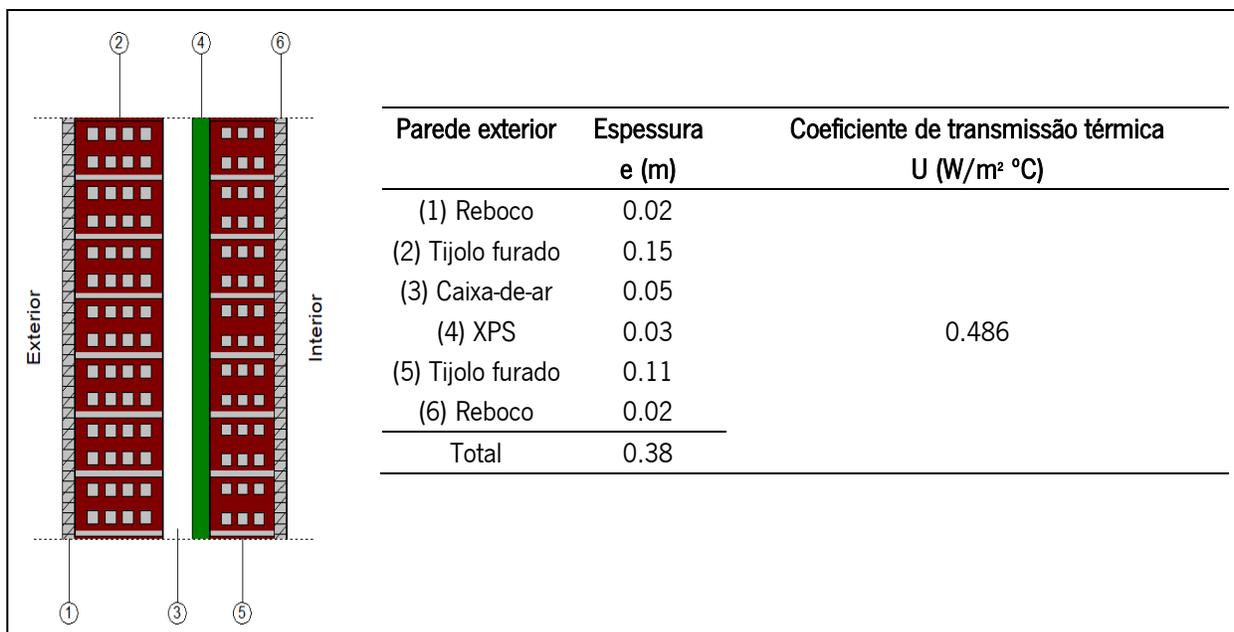


Figura 25 - Solução construtiva das paredes exteriores

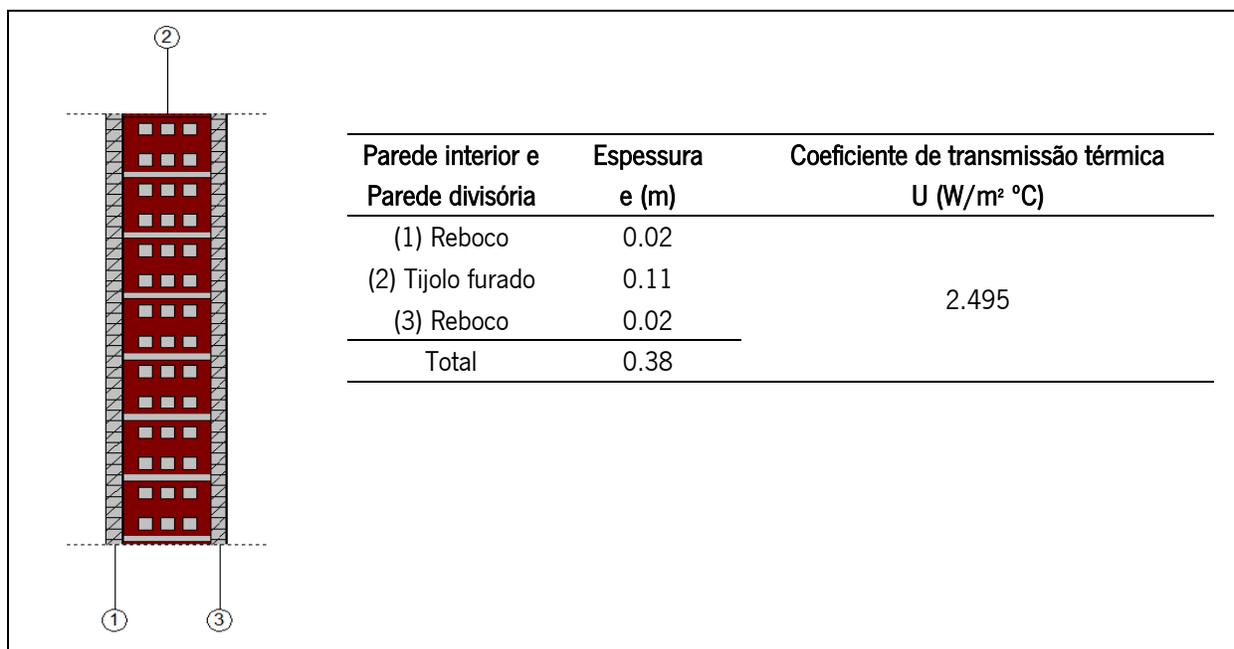


Figura 26 - Solução construtiva das paredes interiores e paredes divisórias

Pavimentos

A laje da cave em contacto com o solo (Figura 27) é constituída por uma camada de brita com 3 cm de espessura (5), uma soleira de betão com 15 cm de espessura (4), isolamento térmico XPS com 3 cm de espessura (3) e piso cerâmico como isolamento (1).

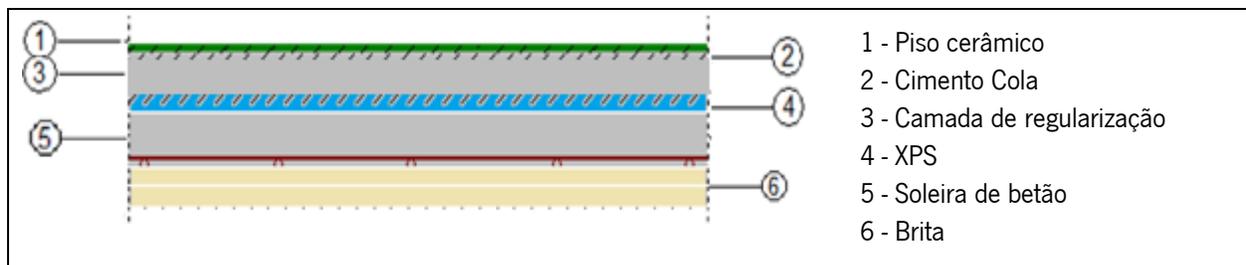


Figura 27 – Solução construtiva da laje da cave em contacto com o solo

A laje de separação entre a cave e o R/C (Figura 28) conta com uma laje aligeirada de vigotas pré-esforçadas (3) com 25 cm de espessura total e revestimento de piso em material cerâmico.

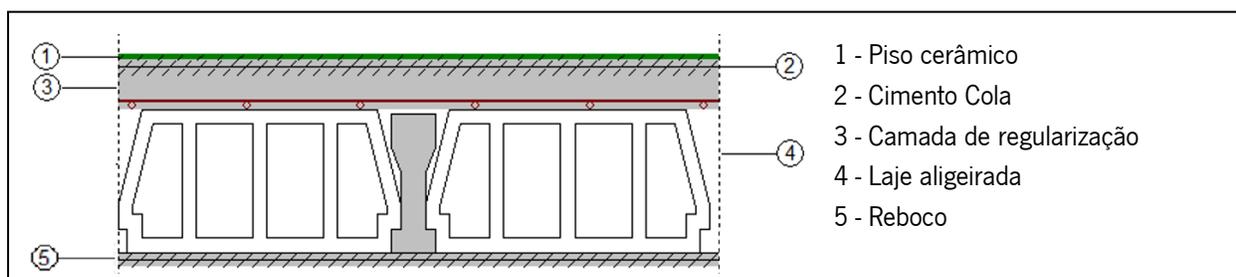


Figura 28 - Solução construtiva da laje de separação da cave com o R/C

A laje de separação entre o R/C e o 1º andar (Figura 29) é constituída por uma laje aligeirada de vigotas pré-esforçadas (2) com 25 cm de espessura total e com revestimento de piso em madeira (1).

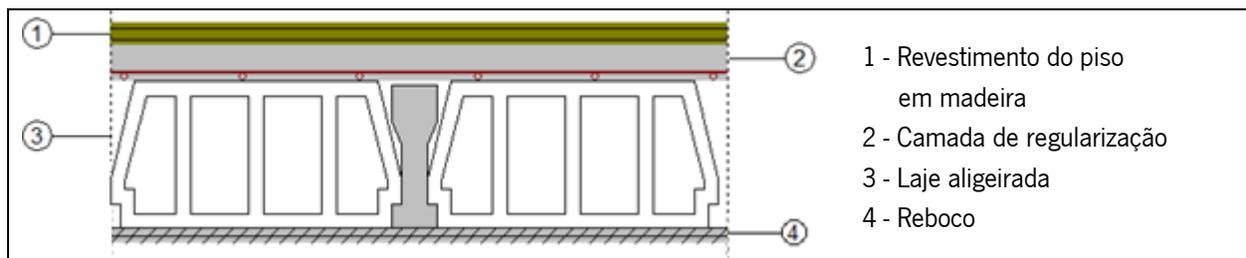


Figura 29 - Solução construtiva da laje de separação do R/C com o 1º andar

Como solução construtiva para a cobertura (Figura 30), é utilizada também uma laje aligeirada de vigotas pré-esforçadas, com 25 cm de espessura total (5), isolamento em XPS (4) com 4 cm de espessura, tela asfáltica para impermeabilização (3) e placas de material pétreo (1) como revestimento. As características térmicas, tais como, condutibilidade térmica, resistência térmica e coeficiente de transmissão térmica relativos às soluções de pavimentos estão apresentados na Tabela 6.

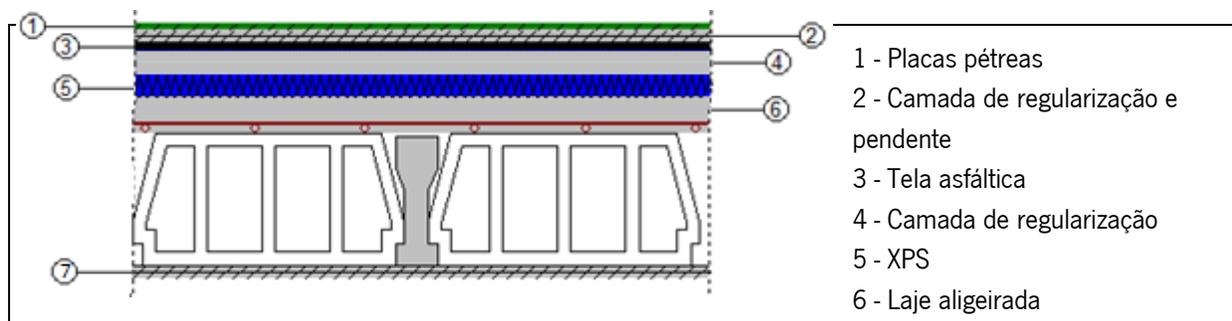


Figura 30 - Laje da cobertura

Tabela 6 – Dados térmicos relativos às soluções construtivas dos pavimentos e cobertura do edifício

| ELEMENTO | Espessura e (m) | Coefficiente de transmissão térmica U (W/m² °C) |
|---|-----------------|---|
| Laje de da cave em contacto com o solo | | |
| Piso cerâmico | 0.01 | 0.59 |
| Cimento cola | 0.03 | |
| Camada de regularização | 0.01 | |
| XPS | 0.03 | |
| Soleira de betão | 0.15 | |
| Brita | 0.03 | |
| Total | 0.27 | |
| Laje de separação entre o R/C e o 1º andar | | |
| Revestimento de piso em madeira | 0.01 | 1.62 |
| Camada de regularização | 0.01 | |
| Laje aligeirada | 0.25 | |
| Reboco | 0.02 | |
| Total | 0.29 | |
| Laje de separação entre a Cave e o R/C | | |
| Piso cerâmico | 0.01 | 1.71 |
| Cimento Cola | 0.03 | |
| Camada de regularização | 0.05 | |
| Laje aligeirada | 0.25 | |
| Reboco | 0.02 | |
| Total | 0.37 | |
| Laje da cobertura | | |
| Revestimento em placas pétreas | 0.02 | 0.36 |
| Camada de regularização e pendente | 0.01 | |
| Tela asfáltica | 0.01 | |
| Camada de regularização | 0.01 | |
| XPS | 0.03 | |
| Laje aligeirada | 0.25 | |
| Reboco | 0.02 | |
| Total | 0.35 | |

Vãos envidraçados

Todos os vãos envidraçados do edifício são compostos por caixilharia em madeira de *kambala*, vidro simples e estore de plástico pelo exterior (Figura 31).

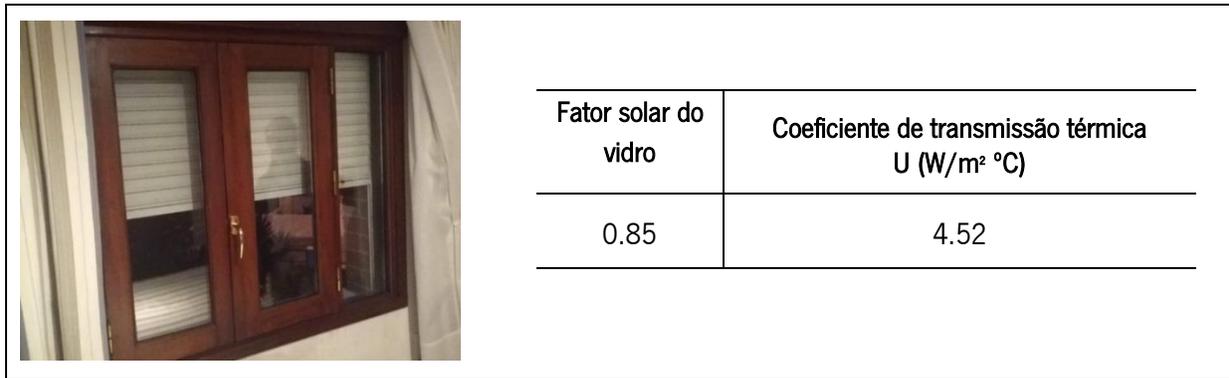


Figura 31 - Vãos envidraçados com caixilharia em madeira de *Kambala* e suas características

3.2.3 Sistemas de climatização

Para aquecimento das águas quentes sanitárias é utilizada uma caldeira a gás natural, situada na garagem (Figura 32). A caldeira a gás é também responsável pelo aquecimento das águas do sistema de aquecimento, associada a um conjunto de radiadores localizados nos diferentes espaços. Esta caldeira tem uma classificação energética C para o aquecimento ambiente e B para o aquecimento das águas sanitárias.

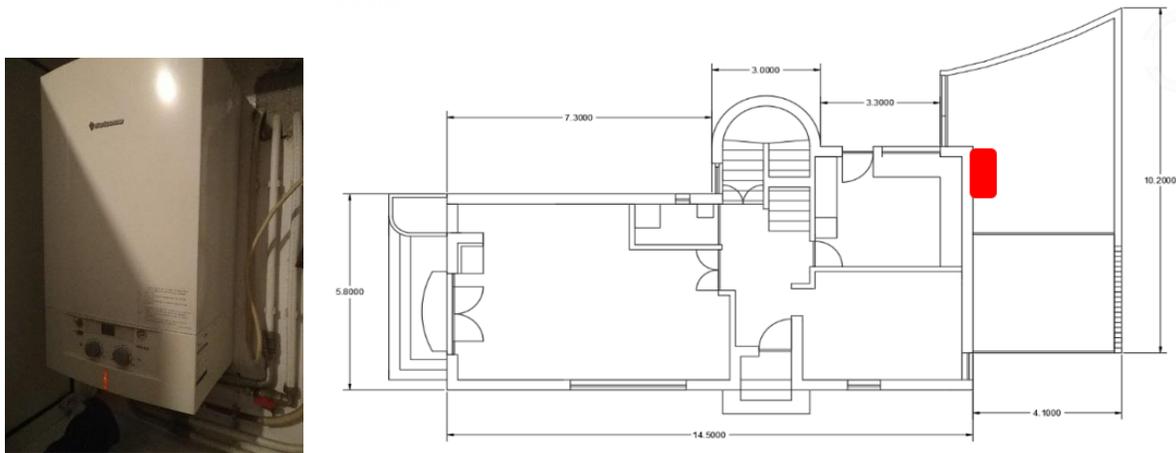


Figura 32 - Vista e Localização da caldeira a gás natural

A habitação possui seis radiadores a água (Figura 33) para aquecimento ambiente, localizados nos quartos, sala e escritórios (R/C e 1º andar). O edifício não possui sistema de arrefecimento.



Figura 33 - Radiador a água

3.3 Programa utilizado na modelação e simulação do edifício

Para a modelação e simulação do edifício foi utilizado o programa de simulação dinâmica *DesignBuilder*. Este programa foi criado pela empresa *DesignBuilder Software Ltd*. O *DesignBuilder* possui as mesmas características e funcionalidades do programa de simulação dinâmica *Energy Plus*, sendo este um dos programas de simulação dinâmica mais reconhecidos no âmbito da avaliação do desempenho energético dos edifícios. Uma das principais diferenças entre o *Energy Plus* e o *DesignBuilder* é que o segundo utiliza o motor de cálculo do primeiro e apresenta uma interface gráfica de utilização e aprendizagem fáceis (DesignBuilder Software, 2002).

Com o *DesignBuilder* é possível facilmente proceder-se à modelação 3D de um edifício, tendo para isso disponíveis ferramentas intuitivas de desenho que permitem de uma forma imediata apresentar volumes, áreas e espessuras de elementos para que desta forma o utilizador tenha uma visão real do trabalho de modelação em curso. É possível criar diferentes zonas dentro do mesmo edifício e atribuir a cada uma delas perfis diferentes de ocupação, atividade, soluções construtivas, sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar condicionado (AVAC) e iluminação.

3.3.1 Definição do modelo de simulação energética do edifício

Executando pela primeira vez o programa *DesignBuilder* foi necessário criar um novo projecto para definir as características primárias do edifício em estudo (Figura 34). Nesta janela é possível definir um título para o projeto, o tipo de análise e a localização do edifício. O programa possui uma lista de localizações disponíveis

e para este caso de estudo foi selecionada a localização Portugal, Viana do Castelo. Desta forma o programa seleciona e guarda todas as informações relativas a essa localização, tais como, início e fim das estações de aquecimento e arrefecimento e condições climáticas.

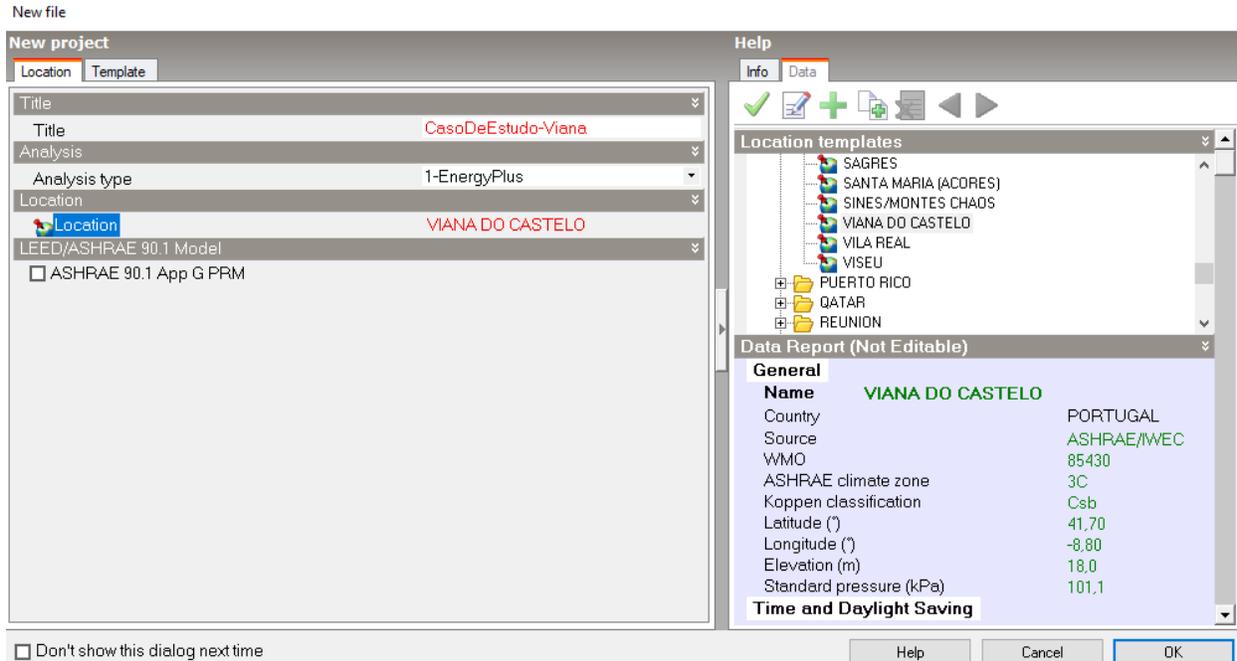


Figura 34 - Criação de novo projeto no programa de simulação

3.3.2 Introdução da geometria do edifício

Depois de definir o título do projeto, o tipo de análise a realizar e a localização do edifício procedeu-se à criação do modelo de simulação do edifício, utilizando para o efeito as ferramentas de desenho do programa disponibilizadas na secção *Layout* (Disposição). Desta forma foi possível dar forma ao edifício em estudo, introduzindo corretamente todas as áreas e volumes do mesmo.

No lado esquerdo da Figura 35, estão listados todos os andares e zonas criados ao criar o modelo do edifício bem como todos os elementos *Component Block* (Bloco de componente) utilizados para complementar esse mesmo desenho. Os *Component Block* (Bloco de componente) são um tipo de introdução de geometria utilizado para desenhar varandas ou elementos que não serão caracterizados posteriormente como zonas habitáveis do edifício em estudo. Na Figura 35 apresenta-se também o modelo do edifício concluído. Pode-se também destacar os elementos representados a cinzento, que representam todos os elementos construtivos do edifício, tais como, paredes exteriores, e cobertura. Os elementos representados a cinzento claro definem

os vãos envidraçados e portas. A cor de rosa estão representados os elementos *Componente Block* (Bloco de componente), tais como, varandas e o terraço por cima da garagem.

Na Figura 36 são apresentadas duas vistas do alçado principal e posterior do edifício com a indicação da orientação norte.

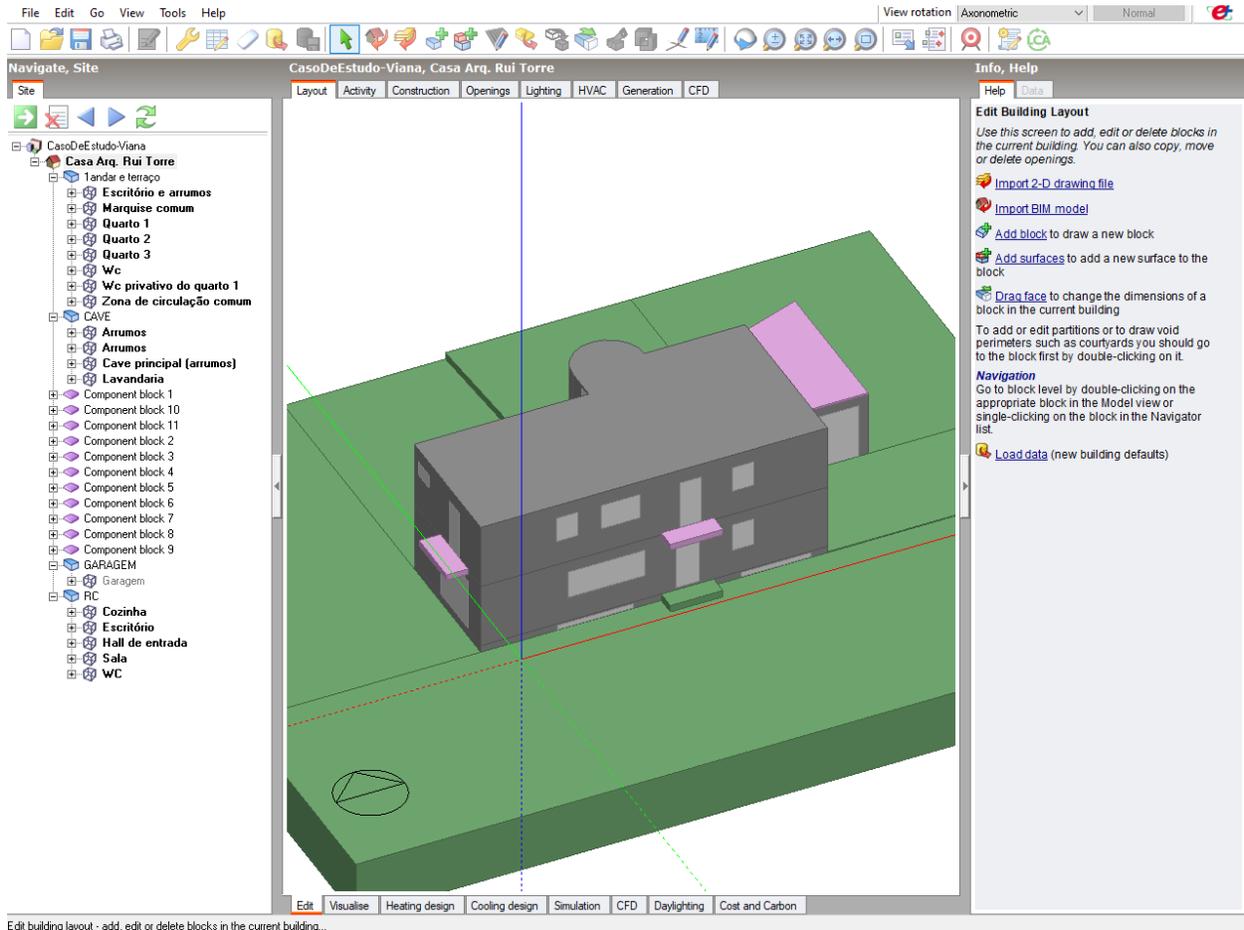


Figura 35 - Modelo do edifício concluído

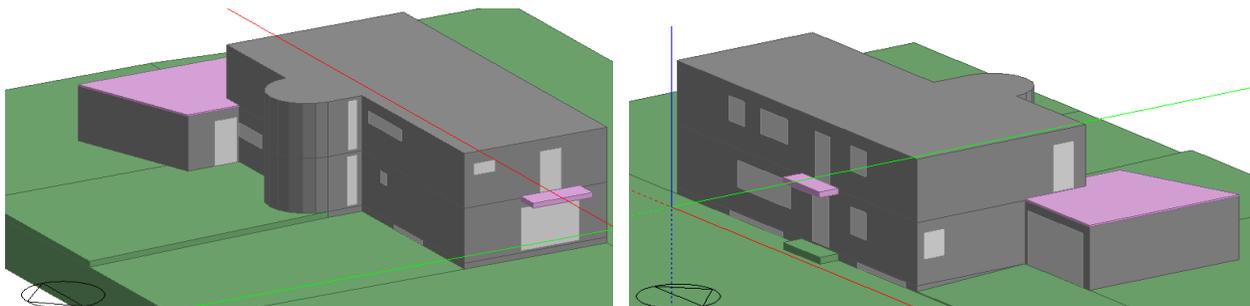


Figura 36 - Vistas do modelo do edifício

3.3.3 Caracterização das zonas, atividade e sistemas de iluminação

Visto que este edifício irá ser alvo de várias análises é crucial que cada divisão do mesmo seja devidamente caracterizada. Para tal é utilizada a secção *Activity* (Atividade) do programa, onde são introduzidos dados referentes à ocupação (pessoas/m²), consumo de água quente (l/m².dia) equipamentos existentes nessas zonas, entre outros (Tabela 7). Em relação às instalações sanitárias foi definido que estas zonas teriam uma ocupação de zero (Pessoas/m²), uma vez que a sua ocupação é pontual. Foram considerados 40 l/pessoa como consumo diário de água quente e foi considerado que os ganhos internos devido aos equipamentos correspondiam a 2 W/m² para cada zona que tem equipamentos como eletrodomésticos, computadores entre outros (“ADENE”, 2020).

Tabela 7 - Caracterização das zonas e atividade

| Zona | Ocupação (Pessoas/m ²) | Atividade |
|-----------------------|------------------------------------|--|
| IS | 0 | - |
| R/C – Sala | 0.0982 | Trabalho de escritório leve/Sentado/Caminhar |
| R/C – Escritório | 0.1143 | Trabalho de escritório leve/Sentado/Caminhar |
| R/C - Cozinha | 0.2506 | Cozinhar/Comer/Beber |
| 1º Andar – Quarto 1 | 0.1067 | Dormir/Sentado |
| 1º Andar – Quarto 2 | 0.0691 | Dormir/Sentado |
| 1º Andar – Quarto 3 | 0.0631 | Dormir/Sentado |
| 1º Andar - Escritório | 0.1355 | Trabalho de escritório leve/Sentado/Caminhar |

Ainda nesta secção do programa é possível definir as temperaturas de *Setpoint* (Ponto de ajuste) para aquecimento e arrefecimento, que definem as temperaturas desejadas para quando a zona em causa está ocupada. Por outro lado, também se podem definir as temperaturas de *Setback* (Ponto de ajuste inverso) para aquecimento e arrefecimento, correspondendo estas às temperaturas requeridas para quando a zona em causa não está ocupada. O programa possui uma vasta lista de *Templates* (Modelos) pré-definidos que podem ser usados para cada zona ou editados por forma a conseguir com mais detalhe caracterizar cada zona do edifício. Na Figura 37 é apresentado um exemplo da secção *Activity* (Atividade) devidamente preenchida para a cozinha do edifício.

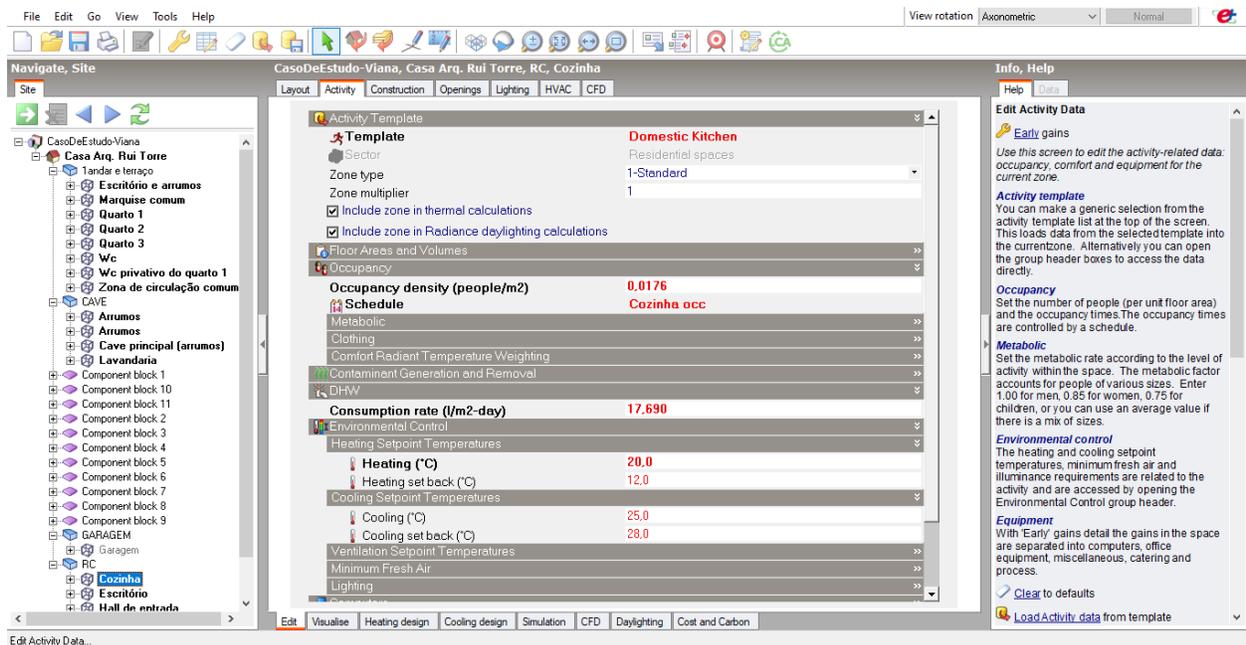


Figura 37 - Secção *Activity* (Atividade) relativa à cozinha do edifício

Nas Figuras 38 e 39, são representadas todas as zonas que foram alvo de caracterização na secção *Activity* (Atividade) do programa.

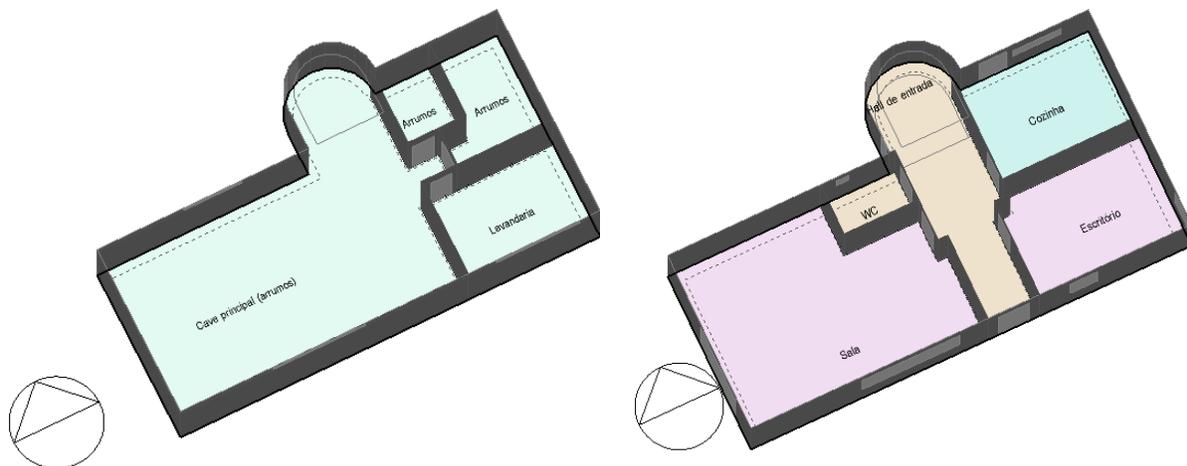


Figura 38 - Representação do modelo de simulação da cave e do R/C do edifício

A iluminação natural é contabilizada automaticamente pelo programa, dependendo do tipo de vãos envidraçados, sua localização e orientação, bem como da localização e orientação do edifício e também a forma de operação e características do sistema de sombreamento, não sendo por isso necessário introduzir nenhum dado relativo a este tipo de iluminação.

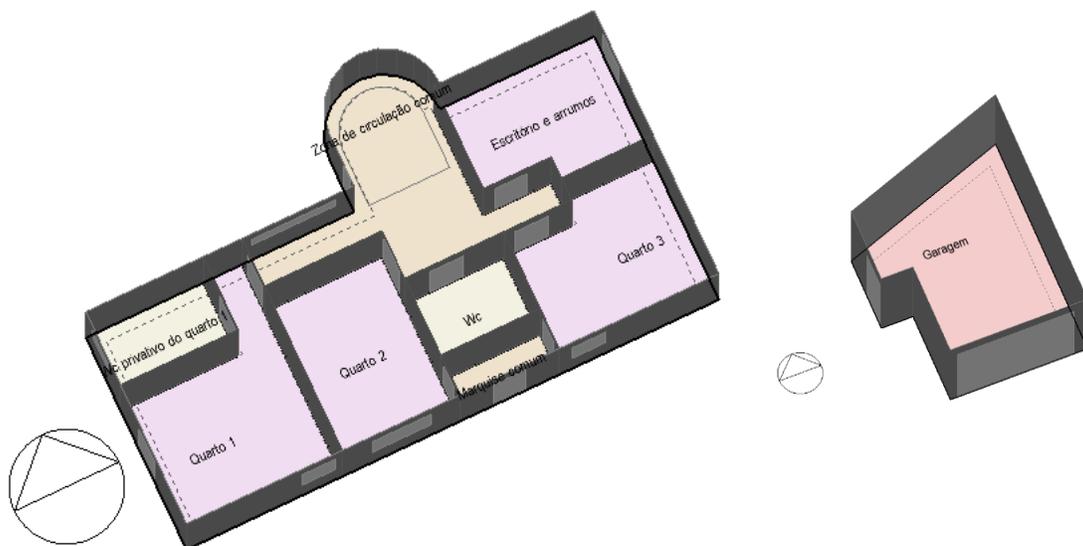


Figura 39 - Representação do modelo de simulação do 1º andar e da garagem do edifício

Para a definição da iluminação artificial, o programa apresenta a secção *Lighting* (Iluminação) (Figura 40). Neste estudo foi utilizado o *Template* (Modelo) LED disponibilizado pelo programa. A iluminação artificial deste edifício é assegurada por lâmpadas LED com uma potência normalizada simplificada de 2.5 (W/m².100 lux), suspensas no teto de cada zona, de acordo com o recomendado pelo *DesignBuilder* para edifícios de ocupação. Os períodos simplificados de utilização da iluminação artificial para a estação de aquecimento e arrefecimento estão representados nas Figuras 41 e 42 respetivamente.

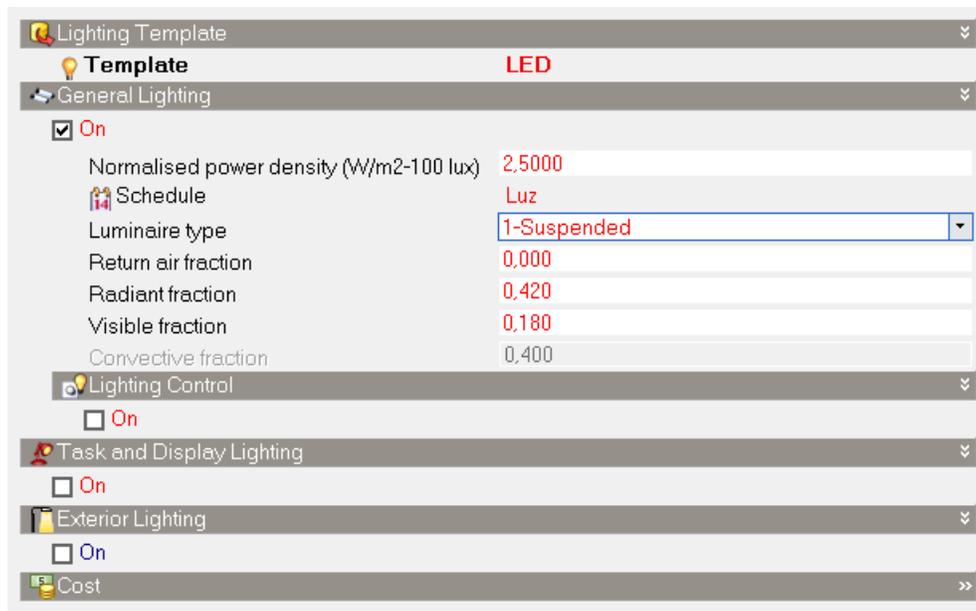


Figura 40 - Janela de definição da iluminação artificial

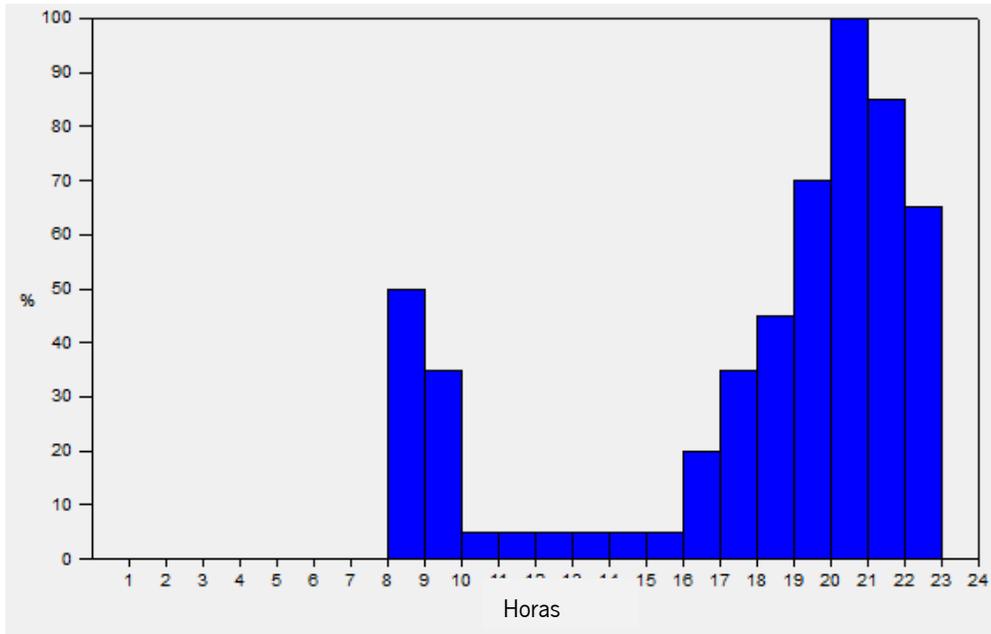


Figura 41 - Utilização, em percentagem, da iluminação artificial durante a estação de aquecimento

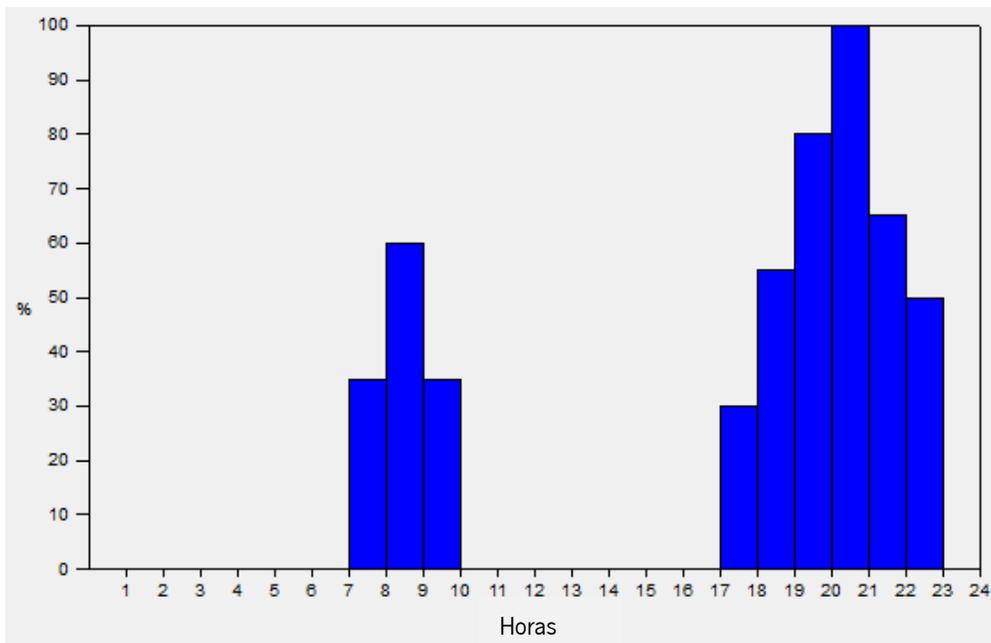


Figura 42 - Utilização, em percentagem, da iluminação artificial durante a estação de arrefecimento

Por fim, é definido um *Schedule* (Horário) que representa a ocupação diária simplificada para cada zona do edifício. Nas Figuras 43,44, 45 e 46 são apresentados os *Schedules* (Horários) da ocupação para cada zona. De salientar que as instalações sanitárias, o piso da cave, a garagem e as zonas de circulação comuns não possuem qualquer ocupação no software uma vez que a sua ocupação é pontual.

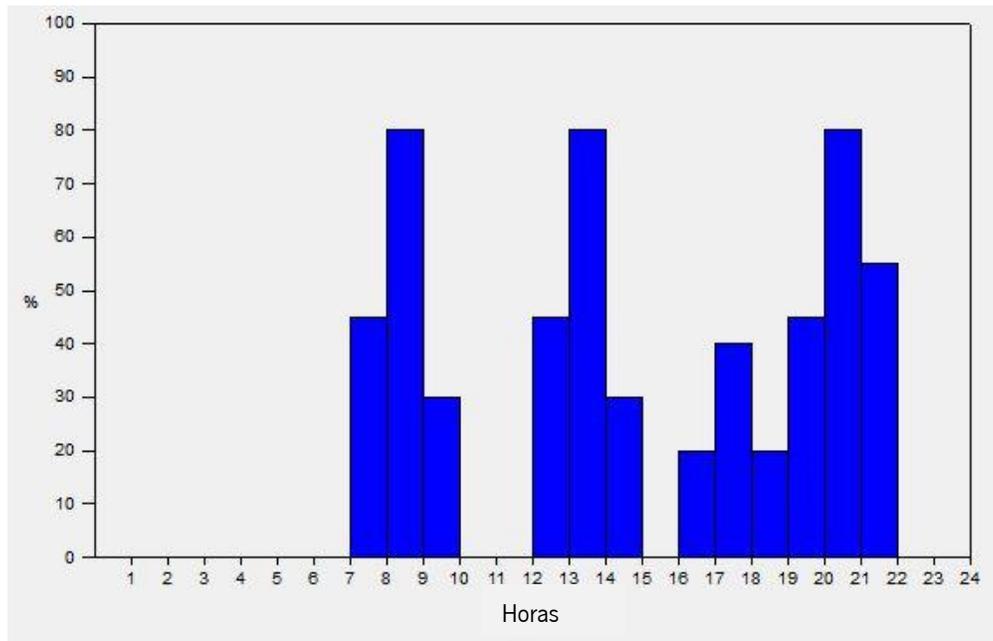


Figura 43 - Ocupação diária simplificada da cozinha do edifício

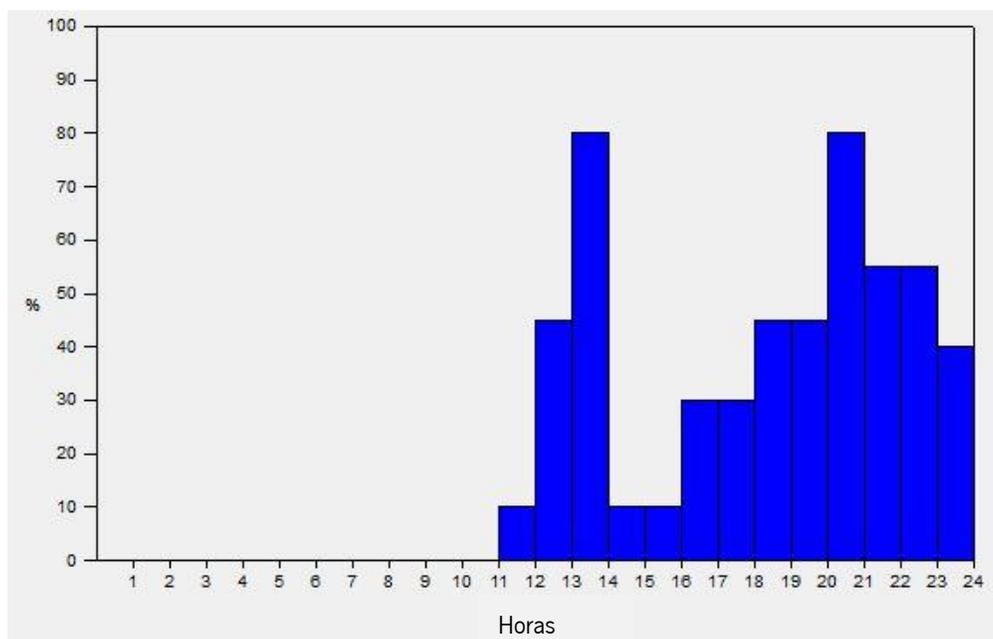


Figura 44 - Ocupação diária simplificada da sala do edifício

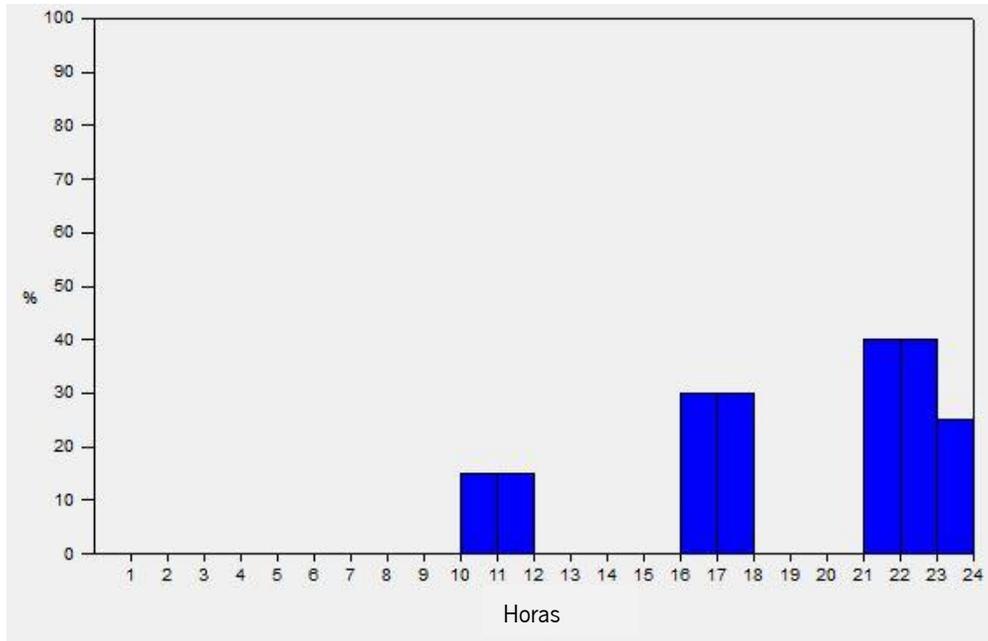


Figura 45 - Ocupação diária simplificada dos escritórios do edifício

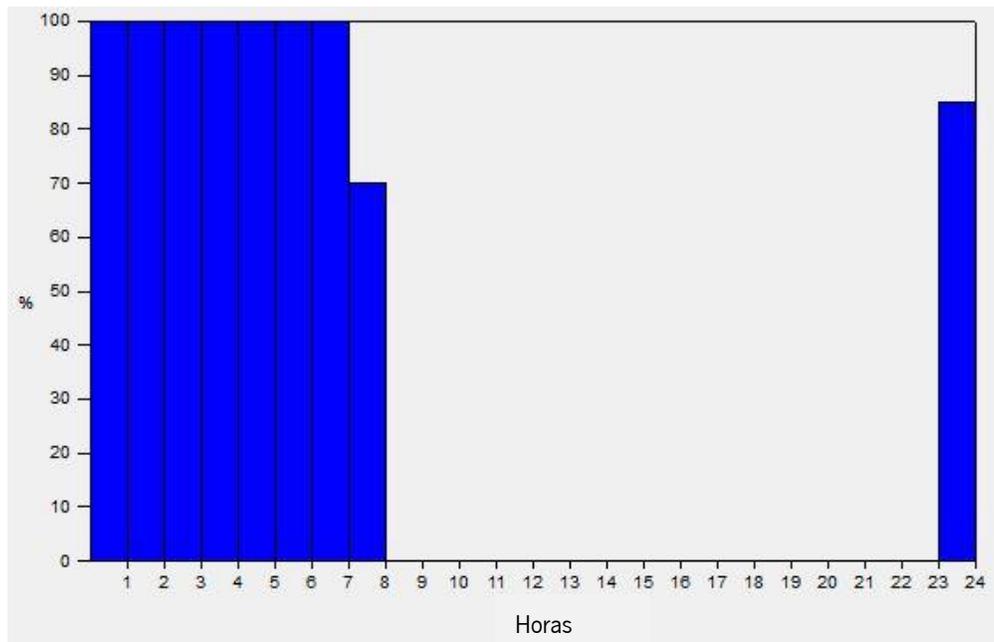


Figura 46 - Ocupação diária simplificada dos quartos do edifício

3.3.4 Inserção das soluções construtivas originais no programa

Neste subcapítulo é abordada a secção *Construction* (Construção) do programa onde é possível introduzir e definir detalhadamente todas as soluções construtivas do edifício, por exemplo, para as paredes exteriores,

paredes interiores e divisórias, pavimentos interiores e intermédios e laje da cobertura. O programa possui vários *Templates* (Modelos) já pré-definidos, podendo ser criados novos *Template* (Modelo) para caracterizar melhor o edifício. Na Figura 47 é possível observar a secção do programa *Construction* (Construção) onde foram introduzidas todas as soluções construtivas do edifício.

O programa possui uma base de dados com diversos materiais que podem ser utilizados para definição das características dos elementos construtivos acima referidos. Na Figura 48 é apresentado um exemplo de definição de um elemento construtivo, as paredes exteriores. Nesta janela de edição do elemento construtivo é possível definir o número de camadas que constituem o elemento, bem como o material utilizado em cada camada e a respetiva espessura.

As soluções construtivas do edifício foram inseridas de acordo com o indicado nas Figuras 25 a 30.

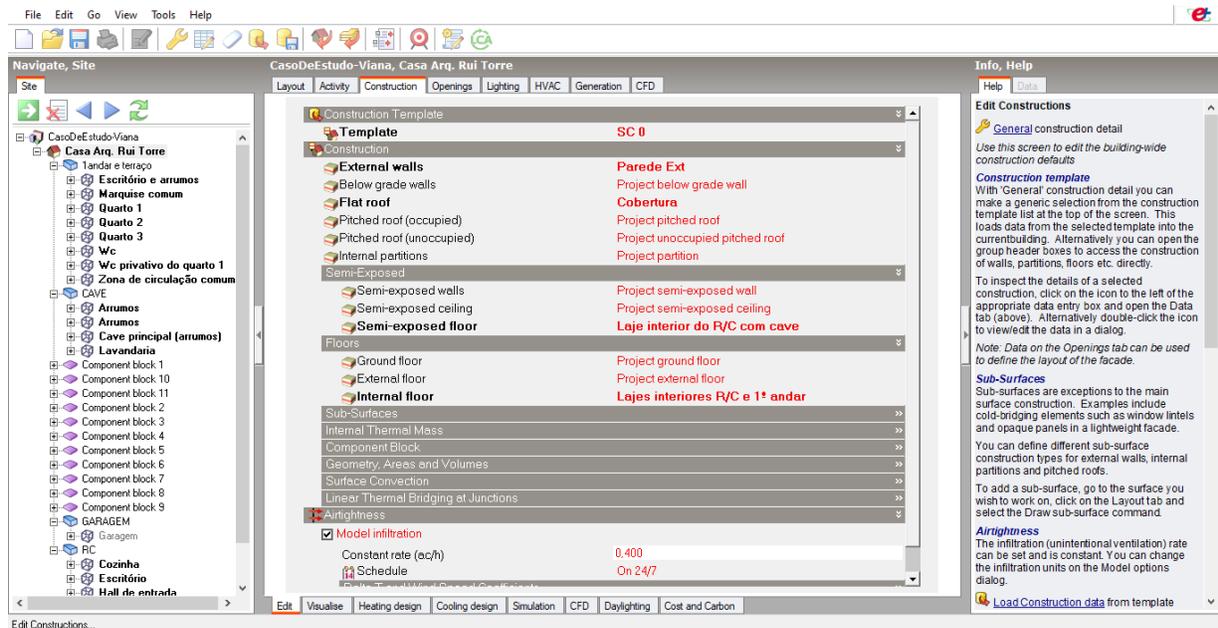


Figura 47 - Secção *Construction* (Construção) do programa

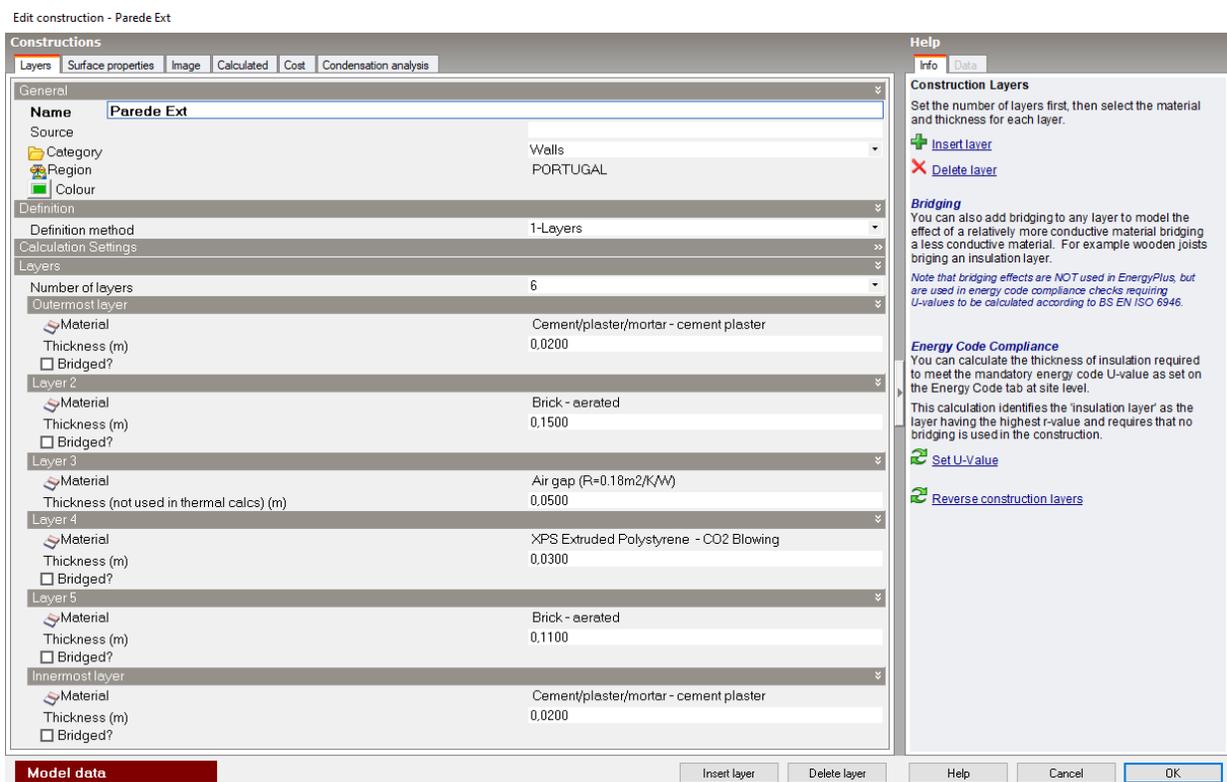


Figura 48 - Secção de definição de um elemento construtivo

3.3.5 Definição dos vãos envidraçados

Para definição dos vãos envidraçados é usada a secção *Openings* (Aberturas) do programa, onde é possível escolher o tipo de vidro utilizado, tipo de caixilharia e sistema de sombreamento. O programa dispõe de uma lista de *Templates* (Modelos) que podem ser usados, mas é possível ao utilizador criar o seu próprio *Template* (Modelo) para melhor definir as características dos vãos envidraçados ou portas em estudo.

A caixilharia dos vãos envidraçados é uma caixilharia de madeira *kambala* (Figura 31) e o sistema de sombreamento foi definido, caracterizando o seu tipo e posição relativamente à janela. Na Figura 49 é apresentada a janela do programa *Openings* (Aberturas) que se destina à definição das características dos vãos envidraçados no modelo em estudo.

Ainda nesta secção, é possível criar um *Schedule* (Horário) relativo aos sistemas de sombreamento, definindo assim a sua utilização ao longo do dia, para todo o ano (Figura 50 e 51). Durante a estação de aquecimento o sistema de sombreamento encontra-se ativo (fechado) durante a noite (21h-7h) por forma a reduzir as perdas através dos vãos envidraçados, sendo que no restante horário, o sistema de sombreamento está

inativo (aberto) para maximizar os ganhos solares. Já durante a estação de arrefecimento o sistema de sombreamento encontra-se parcialmente ativo durante o dia (8h-21h) por forma a reduzir os ganhos solares através dos envidraçados, e durante a noite mantém-se ativo a 35% (21h-8h).

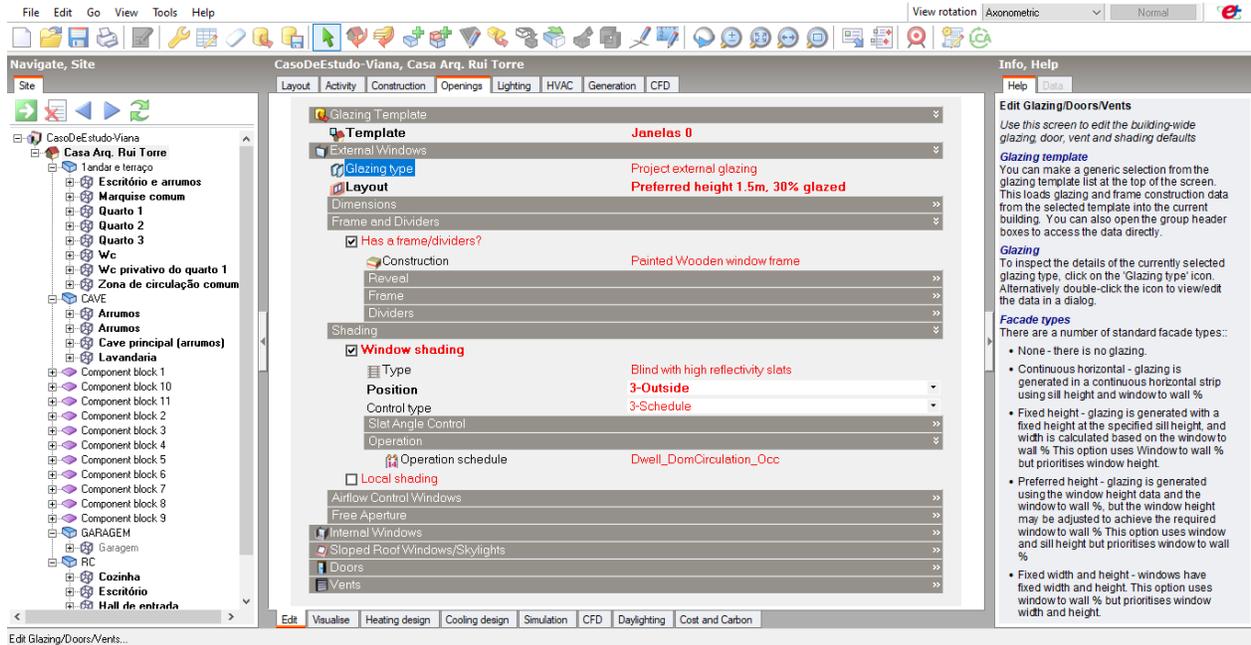


Figura 49 - Secção de definição dos vãos envidraçados

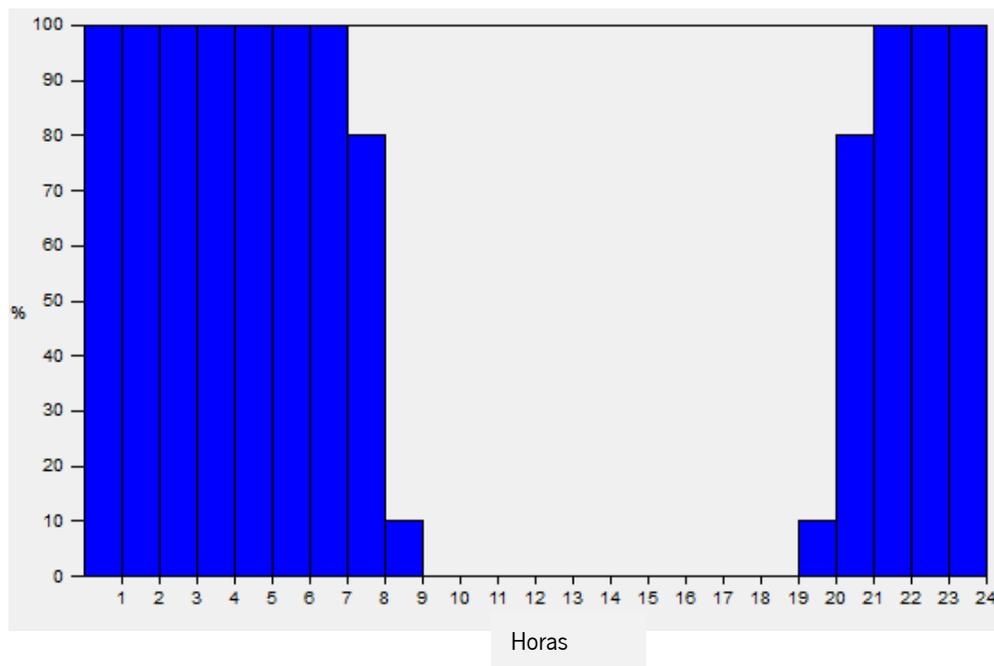


Figura 50 - *Schedule* (Horário) de funcionamento dos sistemas de sombreamento (estores) na estação de aquecimento

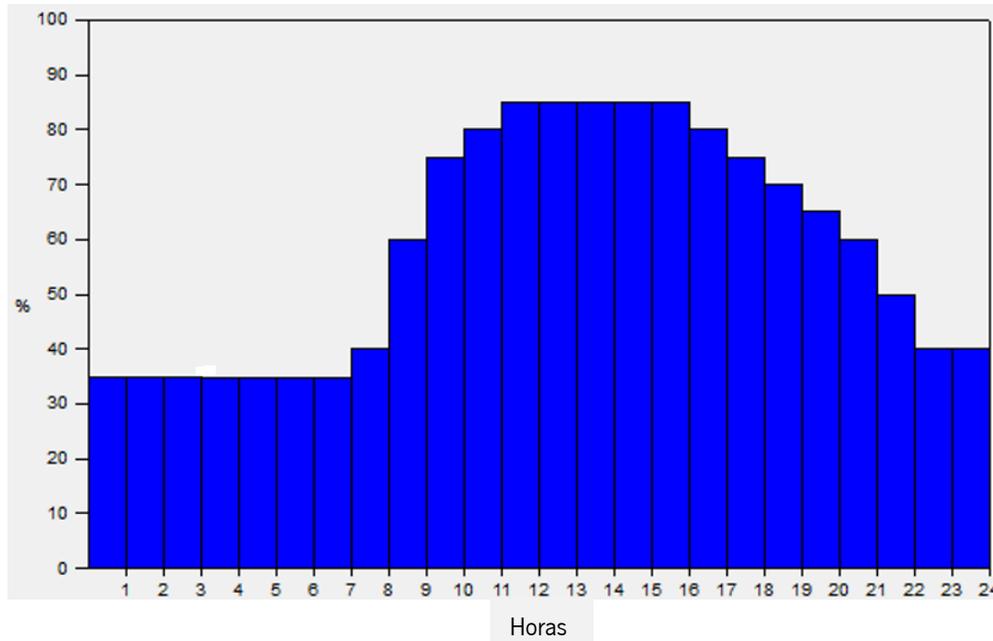


Figura 51 - *Schedule* (Horário) de funcionamento dos sistemas de sombreamento (estores) na estação de arrefecimento

Para definição do tipo de vidro recorreu-se à janela de edição do envidraçado, *Edit glazing* (Editar envidraçados). Aqui é possível definir o número de camadas e o tipo de materiais utilizados. Para este caso de estudo, todos os vãos envidraçados foram igualmente definidos, sendo compostos por um vidro simples de 3 mm, tal como representado na Figura 52 e indicado na Figura 31.

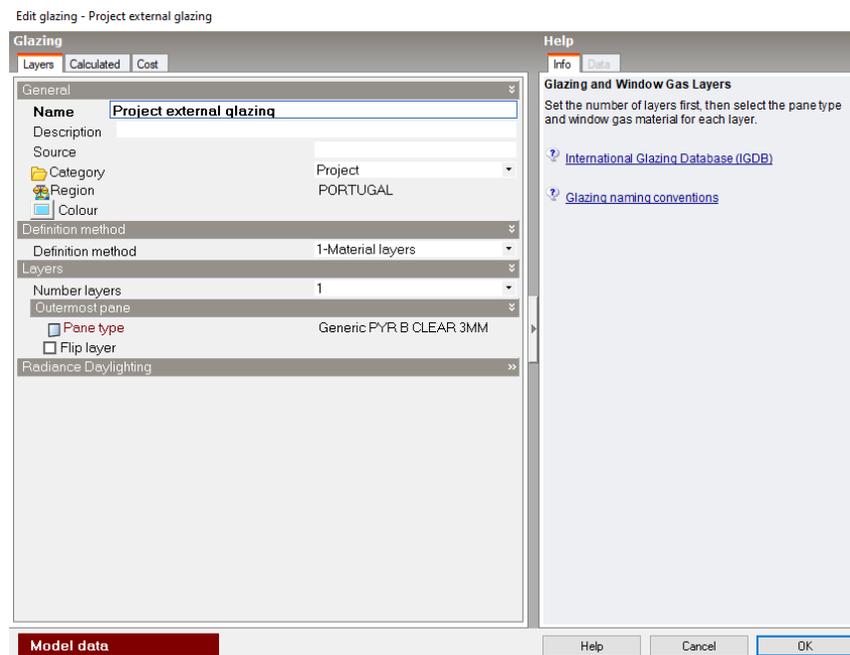


Figura 52 - Definição dos vãos envidraçados

3.3.7 Definição do sistema de climatização

Para terminar a modelação do edifício em estudo, é necessário caracterizar o sistema de climatização de cada zona do edifício. Para tal recorreu-se à secção *HVAC* (Aquecimento, ventilação e ar condicionado) do programa, onde é possível escolher um dos *Templates* (Modelos) já pré-definidos pelo programa ou criar um novo *Template* (Modelo) para cada zona. Na secção *HVAC* (Aquecimento, ventilação e ar condicionado) são caracterizados os sistemas de ventilação mecânica, aquecimento e arrefecimento, aquecimento de águas quentes sanitárias, ventilação natural e artificial. Para o caso de estudo, foi necessário definir três *Templates* (Modelos) distintos para caracterizar todas as zonas do edifício, tal como apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - *Templates* (Modelos) *HVAC* (Aquecimento, ventilação e ar condicionado) utilizados

| <i>Template HVAC</i> | Descrição | Zonas |
|-----------------------|---|---|
| Rad heating, Nat Vent | - Climatização da zona utilizando radiadores a água; - Ventilação natural. | - Quartos; - Sala; - Escritórios. |
| Nat Vent, No H/C | - Sem sistema de climatização; - Ventilação natural. | - Cozinha; - Instalações sanitárias. - Lavandaria |
| <None> | - Sem sistema de climatização; - Sem ventilação natural. | - Cave; - Arrumos; |

A título de exemplo é apresentado na Figura 53 a janela *HVAC* do programa relativa à cozinha do edifício. Nesta secção foi utilizado o *Template* (Modelo) Nat Vent, No H/C, em que foi retirado o “visto” da opção *Heating* (Aquecimento), uma vez que o espaço não é climatizado, e foi selecionada apenas a opção *DHW* (Domestic hot water – AQS, produção de águas quentes sanitárias), e a opção *Natural Ventilation* (Ventilação natural).

No software utilizado, o sistema de aquecimento do edifício irá funcionar de acordo com as temperaturas de *Setpoint* (Ponto de ajuste) e *Setback* (Ponto de ajuste inverso) registadas, ligando e desligando o sistema de aquecimento sempre que for necessário durante as 24h de cada dia, para zonas climatizadas ocupadas, usando a temperatura de *Setpoint* do termostato e para zonas climatizadas não ocupadas usando a temperatura de *Setback* do termostato. Estas temperaturas foram definidas e introduzidas no software e são apresentadas na Tabela 9. As temperaturas de *Setpoint* do termostato foram definidas de acordo com o definido na norma EN 16798-1 para edifícios residenciais de categoria II (CEN, 2019).

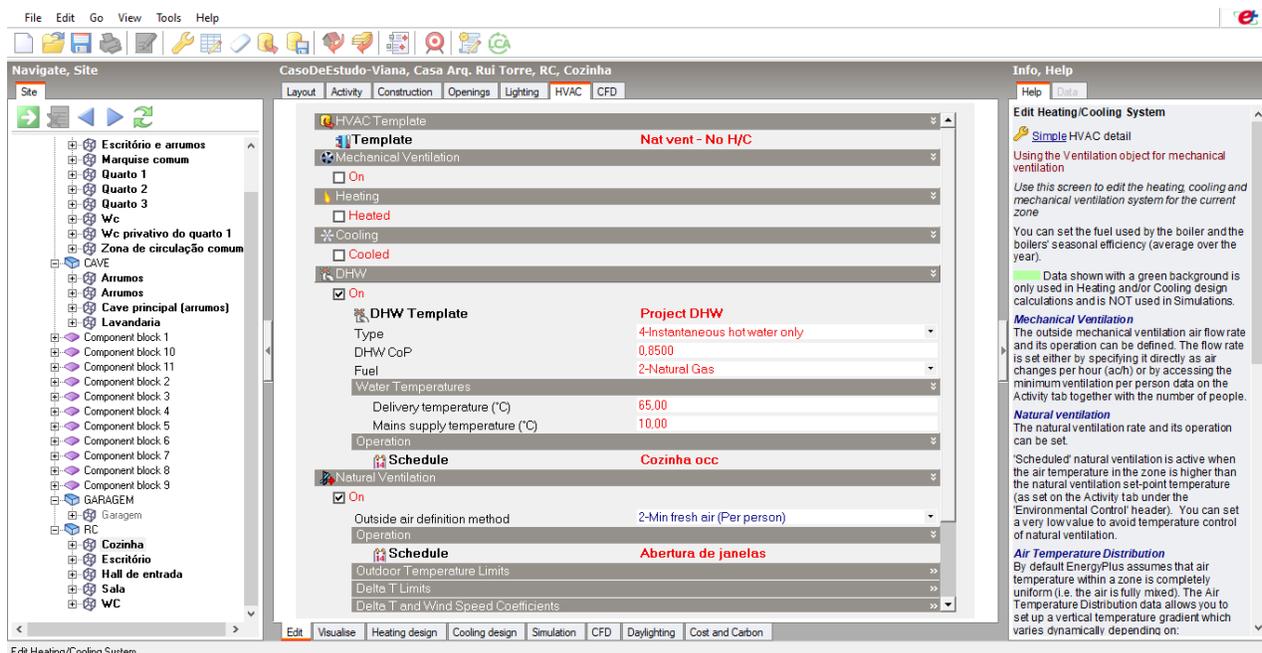


Figura 53 - Janela de definição do sistema HVAC

Tabela 9 - Temperaturas do termostato na estação de aquecimento e arrefecimento

| | Temperatura Setpoint (Ponto de ajuste) – Zona durante o período ocupação | Temperatura Setback (Ponto de ajuste inverso) – Zona fora do período ocupação |
|--------------------------|--|---|
| Estação de aquecimento | 20 °C | 12 °C |
| Estação de arrefecimento | 25 °C | 28 °C |

Na caracterização do sistema de produção das águas quentes sanitárias foi definido um sistema de caldeira a gás natural com um COP (*coeficiente of performance*, Coeficiente de desempenho) de 0.62. Em relação à ventilação natural, foi definido o valor de 0.6 ach (*air changes per hour* / renovações de ar por hora), de acordo com o recomendado pela norma EN 16798-1, e introduziu-se um *Schedule* (Horário) que dita o funcionamento de abertura das janelas nessa zona (que se aplica aos restantes espaços que possuem janelas) (Figuras 54 e 55) (CEN, 2019).

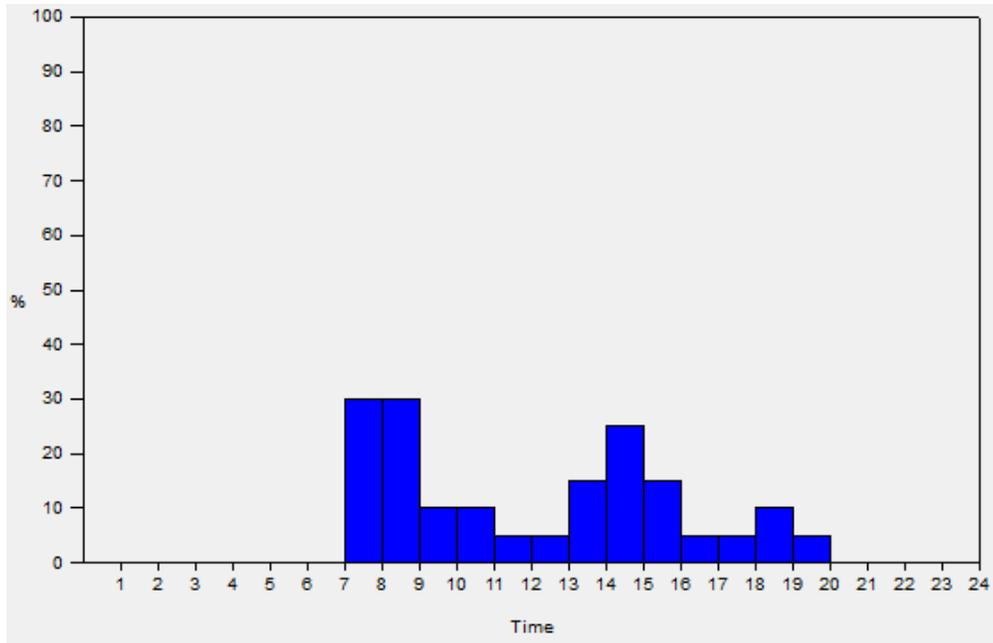


Figura 54 - *Schedule* (horário) de abertura de janelas na estação de aquecimento

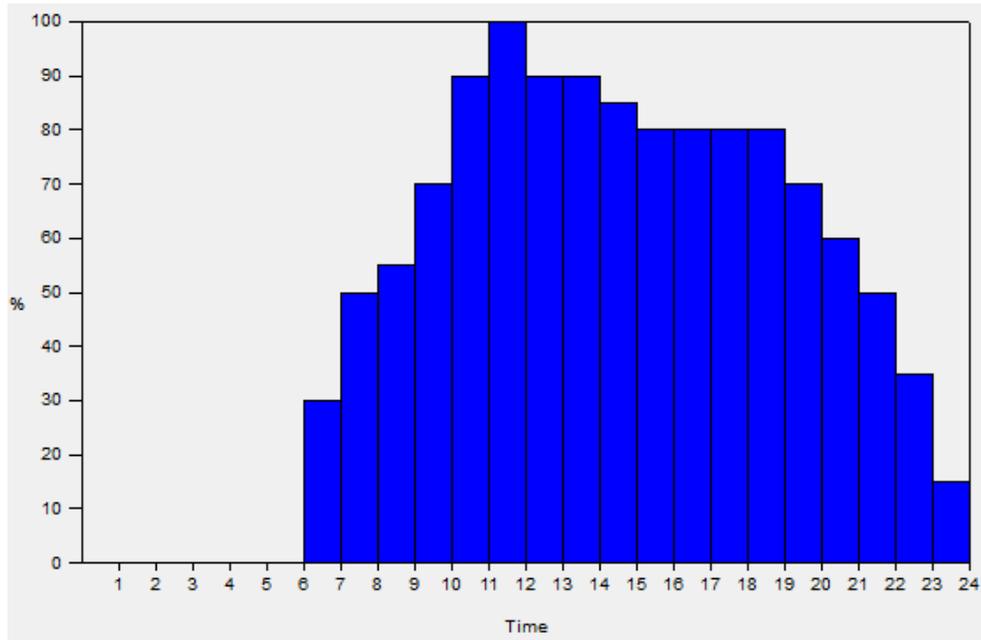


Figura 55 - *Schedule* (horário) de abertura de janelas na estação de arrefecimento

3.4 Qualidade do ambiente interior

A qualidade do ar no interior dos edifícios pode ser melhorada de duas formas, com a redução das fontes poluentes e pela melhoria da ventilação. As cargas poluentes emitidas pelos ocupantes e pelos materiais de um edifício são apresentadas na Tabela 10 e na Tabela 11 (CEN, 2019).

Tabela 10 - Carga sensorial de poluentes emitidos pelos ocupantes (adaptado de (CEN, 2019))

| Atividade | Carga de poluição sensorial olf/ocupante | CO ₂ l/h.ocupante |
|--|---|---------------------------------|
| Sedentária (1 a 1,2 met), 0% fumadores | 1 | 19 |

Tabela 11 - Carga sensorial de poluentes emitidos pelos materiais do edifício (adaptado de (CEN, 2019))

| Carga sensorial de poluição (valor médio) olf/m ² | |
|---|-----|
| Edifícios novos (sem fumadores) | |
| Edifício com materiais pouco poluentes (<i>low-polluting</i>) | 0.1 |

A taxa de ventilação para conforto é calculada através da equação 1 (CEN, 2019).

$$Q_c = 10 \frac{G_c}{C_{c,i} - C_{c,o}} \frac{1}{\epsilon_v} \quad (1)$$

Onde,

Q_c – Taxa de ventilação, em l/s;

G_c – Carga sensorial dos poluentes, em olf;

$C_{c,i}$ – Percepção da qualidade do ar interior pretendida, em dp;

$C_{c,o}$ – Percepção da qualidade do ar exterior nas aberturas de admissão de ar do sistema de ventilação, em dp;

ϵ_v – Eficácia da ventilação

Para o edifício em estudo foram analisadas três zonas, nomeadamente, a sala de estar, o escritório com maior área e o quarto com maior área e ocupação. Tendo em conta que neste estudo, para os escritórios e foi utilizado o de maior área e para os quartos foi utilizado o quarto com maior área e ocupação, confirmando

que foi assegurada a qualidade do ambiente interior para estes espaços, conseqüentemente também se verifica para os restantes.

A metodologia e cálculos efetuados tem como pressuposto o seguinte (CEN, 2019):

- Nenhum dos ocupantes é fumador;
- Todos os ocupantes se encontram em atividade sedentária;
- O edifício encontra-se localizado numa cidade com ar de boa qualidade ($C_{e,0} = 0.1$ dp);
- O edifício é uma construção já existente (com cerca de 20 anos) e os seus materiais são pouco poluentes (*low-polluting*), considerou-se a uma carga sensorial de 0.1 olf/m²;
- As janelas do edifício proporcionam boa ventilação ao mesmo, sendo a eficácia de ventilação neste caso de, $\epsilon_v = 0.9$.
- Áreas da sala de estar, escritório e quarto são, 40.73m^2 , 17.49m^2 e 18.73m^2 , respetivamente.

Na definição do edifício no programa DesignBuilder foi utilizado uma taxa de ventilação de 0.6 ach (*air changes per hour / renovações de ar por hora*) definido na norma EN 16798 (2019) como sendo o valor mínimo necessário de taxa de ventilação para garantir aos ocupantes do edifício uma situação de conforto. No subcapítulo 4.1 é feita a análise à qualidade do ambiente interior do edifício, com o objetivo de calcular a taxa de ventilação necessária para garantir a qualidade do ambiente interior das zonas mais importantes.

3.5 Metodologia para a análise do conforto térmico

O estudo das condições de conforto térmico, para a estação de arrefecimento, foi realizado considerando a metodologia de conforto térmico adaptativo definida na norma ASHRAE 55: 2017, uma vez que o edifício não possui sistema de arrefecimento.

Este modelo é válido para ambientes sem meios mecânicos de arrefecimento do ar e em que o utilizador tenha controlo sobre a abertura das janelas, sendo a ventilação natural a principal forma de arrefecimento, tal como no edifício em estudo. A norma limita a aplicação deste modelo a temperaturas médias mensais exteriores entre os 10 e os 33.5°C e níveis de atividade dos ocupantes entre 1.0 e 1.3 met, e onde os ocupantes dos espaços podem alterar o seu vestuário em função das condições térmicas interiores e exteriores, como é o caso de um edifício de habitação (ASHRAE, 2017).

A ASHRAE 55:2017 aplica o modelo adaptativo a espaços não climatizados (com ventilação natural), assim, as temperaturas interiores de espaços que verifiquem os critérios definidos podem ser determinadas a partir do gráfico da Figura 56 (ASHRAE, 2017). O modelo considera duas classes de conforto correspondendo a 80% e 90% de aceitação/satisfação dos utilizadores (ASHRAE, 2017).

Neste estudo foi analisado o desempenho térmico do edifício para uma semana típica de verão através de duas simulações efetuadas no programa *DesignBuilder*, na sua situação original e na situação de edifício reabilitado. Através dessas simulações foram obtidos os dados necessários, a temperatura operativa interior mais alta registada nessa semana, a temperatura exterior média mensal predominante, e as horas de desconforto dos ocupantes. Com estes dados foi possível avaliar o desempenho do edifício na estação de arrefecimento e verificar a necessidade de implementação de um sistema de arrefecimento.

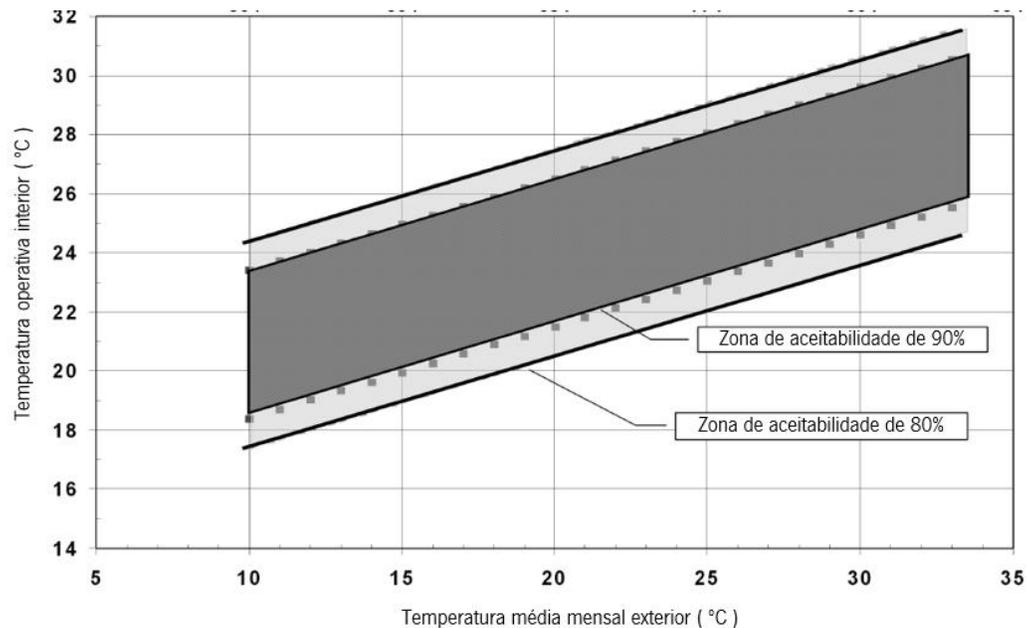


Figura 56 - Análise da situação de conforto térmico – modelo adaptativo da ASHRAE 55:2017 (Hoyt *et al.*, 2019)

A zona de conforto (Figura 56) correspondente a 80% de aceitabilidade, com uma banda de 7°C em torno da temperatura operativa de conforto, é aplicável a situações correntes. A zona de conforto correspondente a 90% de aceitabilidade, com uma largura de banda de 5°C em torno da temperatura operativa de conforto, deve ser aplicada a edifícios onde se exigem níveis de conforto elevados (Hoyt *et al.*, 2019)

A aplicação do método de conforto térmico adaptativo preconizado na norma ASHRAE 55:2017 foi realizada com o auxílio do Modelo de conforto térmico da ferramenta de CBE Thermal Comfort Tool (Hoyt *et al.*, 2019).

3.6 Metodologia para a análise económica do caso de estudo

Neste trabalho foi realizada uma análise económica tendo como principal objetivo identificar as medidas, ou combinações de medidas de reabilitação que apresentam uma melhor relação custo/benefício. Para atingir este objetivo foram calculados os custos de intervenção, a poupança energética anual e o período de retorno de investimento, para cada uma das medidas de reabilitação estudadas e suas combinações. De salientar que neste estudo foram também considerados os custos relacionados com a manutenção destas mesmas medidas, sendo que a única medida de reabilitação com necessidade de manutenção ao longo da sua vida útil é a aplicação do sistema ETICS. Está será uma manutenção decenal, que consiste na limpeza e desinfeção da fachada, reparação de danos de impacto, correção de fissuras e microfissuras e aplicação de pintura antifúngica respirável (<http://beirisol.pt/servicos/manutencao-de-etics/>). A vida útil de um sistema de reforço de isolamento térmico das paredes exteriores ou da cobertura é de cerca de 25 a 40 anos (Raposo, 2009).

Inicialmente foi necessário calcular os custos de intervenção para cada medida de reabilitação, utilizando para o efeito um site de gerador de preços, da CYPE (Gerador de preços, n.d.). Na Tabela 12 estão apresentados os custos de intervenção para cada a aplicação de cada medida de reabilitação e também os custos de manutenção decenal relativos ao sistema ETICS.

Tabela 12 - Custos de intervenção para cada medida de reabilitação proposta

| Medida de reabilitação | Custos de manutenção decenal (€/m ²) | Custo de intervenção (€/m ²) |
|------------------------|--|--|
| ETICS4 | 3.47 | 36.65 |
| ETICS6 | 3.47 | 40.82 |
| ETICS8 | 3.47 | 45.29 |
| C4 | | 10.98 |
| C6 | | 14.28 |
| C8 | | 18.58 |
| V Duplo 4/12/4 | | 37.11 |

Com o valor da intervenção em €/m² e a área de cada solução construtiva foi então possível calcular o valor de investimento estimado para a execução de cada solução construtiva de reabilitação. De forma a calcular a poupança anual energética associada aos gastos para aquecimento foi necessário ter conhecimento do preço do gás natural (€/kWh) e fazer uma extrapolação para o futuro. Consultando o *website* da EDP foi

possível ter acesso a todos os valores para o preço do gás natural, e para este trabalho foi considerado um valor médio de 0.05630 €/kWh (de acordo com o fornecedor atual) (EDP Comercial, n.d.). Considerando um crescimento anual médio de 2.5% foi efetuada uma projeção para 30 anos do preço do gás natural estando essa mesma projeção representada na Figura 57 (“REN”, 2014).

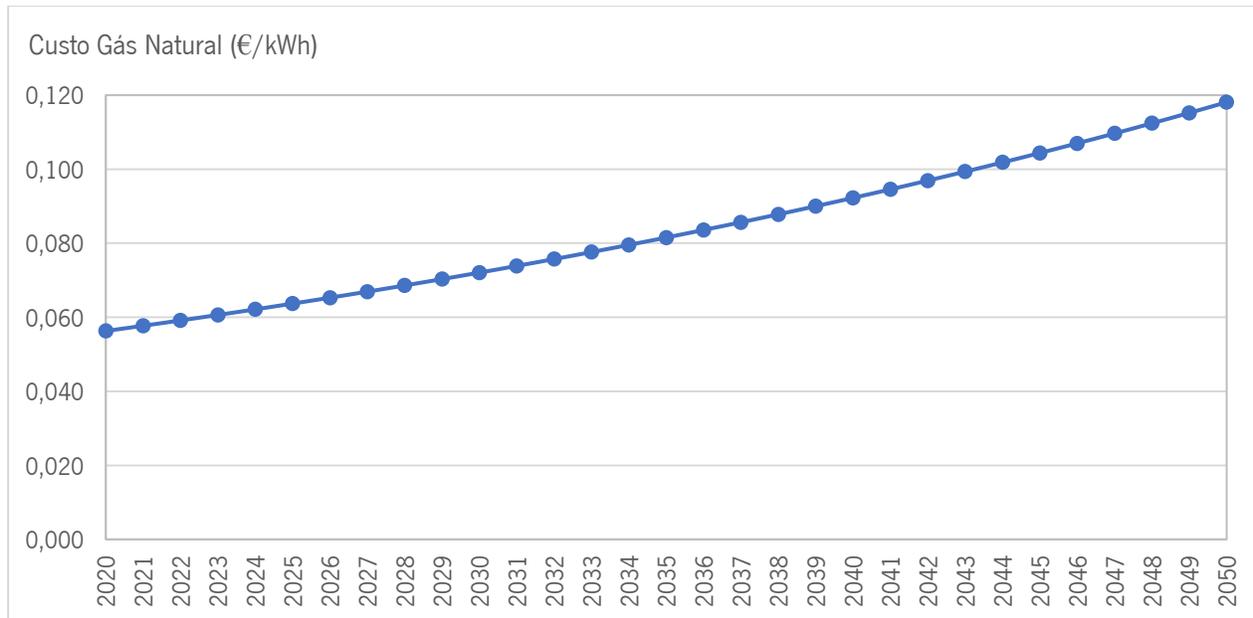


Figura 57 - Projeção do preço do gás natural

Considerando os valores da variação do preço do gás natural ao longo dos anos foi possível calcular a poupança energética anual, para um ano horizonte de 30 anos, relativa a cada medida de reabilitação e combinação de medidas de reabilitação.

Por fim, para calcular o período de retorno de investimento para cada solução, foi necessário contabilizar o número de anos decorridos desde o momento da implementação da medida de reabilitação, até o valor da poupança energética se igualar ao valor do investimento feito para a implementação da medida de reabilitação. A análise económica para este caso de estudo considerou uma extensão de 30 anos na vida útil do edifício. Considerar-se-á uma solução inviável, aquela que apresentar períodos de retorno de investimento superiores a 30 anos.

3.7 Apresentação das medidas de reabilitação propostas

Neste subcapítulo são apresentadas as medidas de reabilitação propostas que serão posteriormente simuladas e analisadas nos subcapítulos 4.2 e 4.3. As medidas de reabilitação escolhidas para melhorar o

desempenho energético do edifício em estudo foram: reforço do isolamento térmico das paredes exteriores (aplicação do sistema ETICS); reforço do isolamento térmico da cobertura; e, por último, substituição do sistema dos vãos envidraçados. Estas soluções são apresentadas de seguida.

Reforço do nível de isolamento térmico das paredes exteriores

Para o reforço do isolamento térmico das paredes exteriores, foi proposta a aplicação de um sistema ETICS, que se baseia na aplicação de isolamento térmico na face exteriores das paredes exteriores. O reforço do isolamento térmico pelo exterior é considerado o mais eficaz e também de maior facilidade de aplicação, sendo por isso o único tipo de solução preconizada neste estudo.

Na Figura 58 e na Tabela 13 está representada a solução construtiva das paredes exteriores, depois da aplicação do sistema ETICS utilizando como material de isolamento o poliestireno expandido (EPS), considerando diferentes espessuras de isolamento térmico, destacando também a espessura final do elemento (m), resistência térmica R ($m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$) e coeficiente de transmissão térmica U ($\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$).

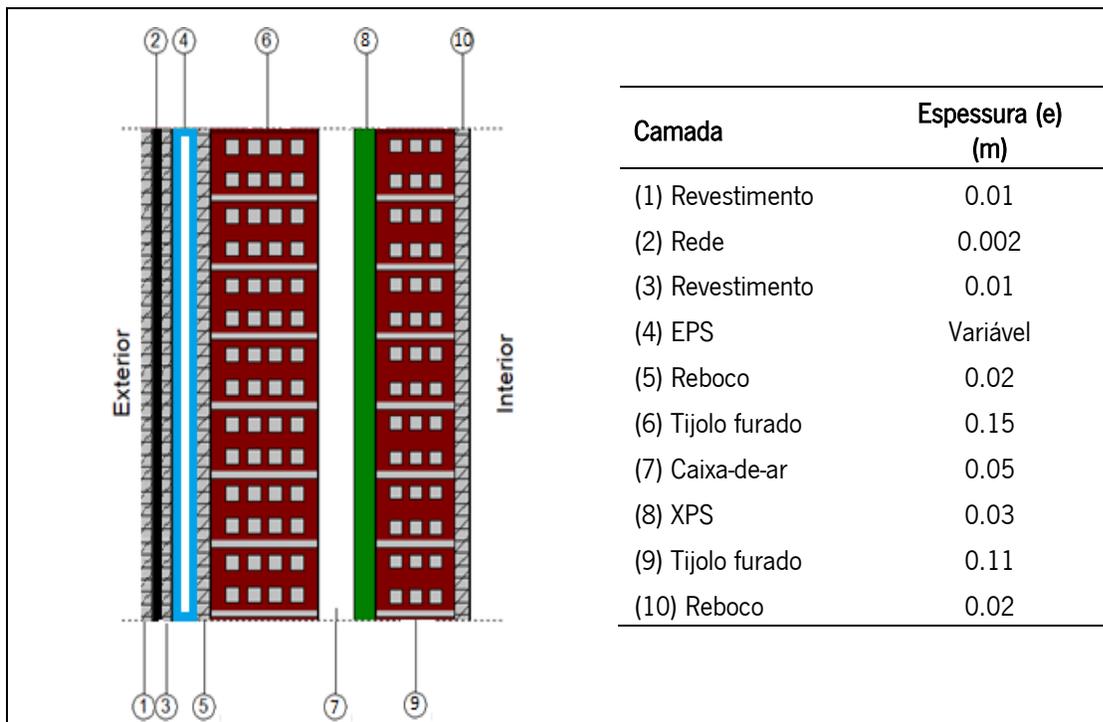


Figura 58 - Solução construtiva das paredes exteriores após aplicação do sistema ETICS

Tabela 13 - Dados térmicos da solução construtiva de reabilitação da parede exterior para diferentes espessuras de isolamento térmico

| Espessura do isolamento térmico (EPS) a aplicar (cm) | 4 | 6 | 8 |
|--|---------------|---------------|---------------|
| Espessura total do elemento (m) | 0.44 | 0.46 | 0.48 |
| Resistência térmica, R (m ² °C/W) | 3.165 | 3.665 | 4.165 |
| Coefficiente de transmissão térmica, U (W/m ² °C) | 0.316 | 0.273 | 0.240 |
| Designação da Solução | ETICS4 | ETICS6 | ETICS8 |

Isolamento térmico da cobertura

Quanto à medida de reabilitação para a cobertura, considerando que as camadas de impermeabilização estão em bom estado de conservação, uma vez que não é o objeto da análise efetuada, foi proposta a remoção temporária das placas pétreas para colocação da camada de reforço do isolamento térmico (em XPS), num sistema de cobertura invertida, e posterior recolocação do acabamento. Na Figura 59 está representada a solução construtiva final da cobertura, com a espessura variável do reforço de isolamento.

Na Tabela 14 está representada a solução construtiva final da cobertura após reabilitação, com diferentes espessuras de isolamento térmico, destacando também a espessura final do elemento (m), resistência térmica R (m² °C/W) e coeficiente de transmissão térmica U (W/m² °C).

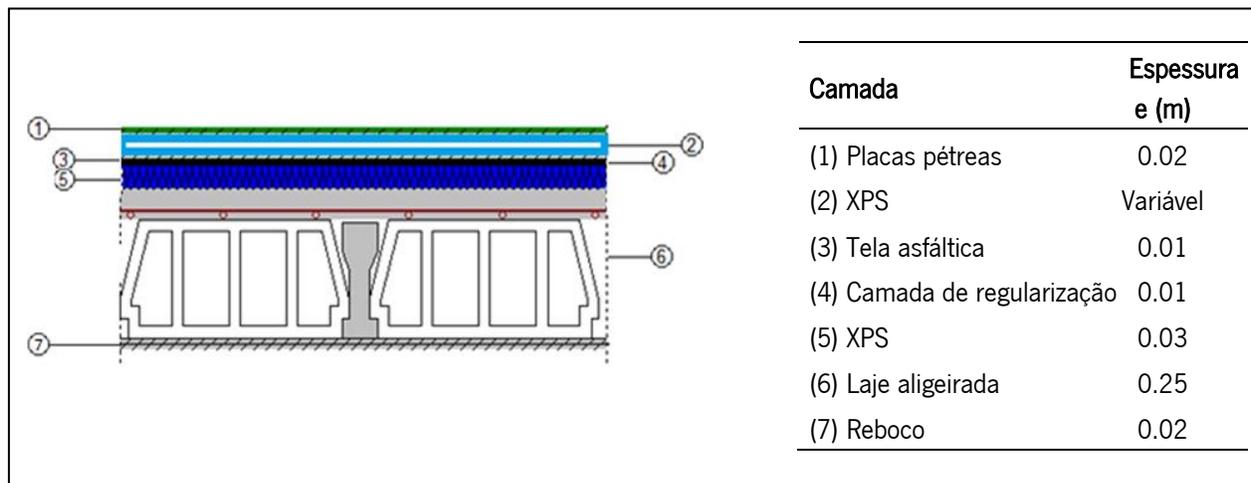


Figura 59 - Solução construtiva da cobertura após aplicação da medida de reabilitação

Tabela 14 - Dados térmicos da solução construtiva de reabilitação da cobertura para diferentes espessuras de isolamento térmico

| Espessura do isolamento térmico a aplicar, XPS (cm) | 4 | 6 | 8 |
|--|-----------|-----------|-----------|
| Espessura total do elemento (m) | 0.38 | 0.40 | 0.42 |
| Resistência térmica, R (m ² °C/W) | 2.71 | 3.25 | 3.79 |
| Coefficiente de transmissão térmica, U (W/m ² °C) | 0.369 | 0.308 | 0.264 |
| Designação da Solução | C4 | C6 | C8 |

Vãos envidraçados

O edifício possui vãos envidraçados com vidro simples e caixilharia em madeira de *kambala*. A solução de reabilitação proposta foi a substituição de vidro simples para outro tipo de sistema, mantendo a caixilharia em madeira. Na Tabela 15 apresentam-se as diferentes soluções propostas para a substituição dos vãos envidraçados, apresentando a sua tipologia, valor de transmissão solar e coeficiente de transmissão térmica U (W/m² °C)

Tabela 15 - Dados térmicos das soluções de vãos envidraçados propostos

| Designação da Solução | Tipologia (mm) | Transmissão solar | Coefficiente de transmissão térmica - U (W/m ² °C) |
|-----------------------|------------------|-------------------|---|
| VE1 | 6*/6**/6* | 0.666 | 2.142 |
| VE2 | 3*/6**/3* | 0.682 | 2.173 |
| VE3 | 4*/12**/4* | 0.649 | 1.789 |
| VE4 | 3*/6**/3*/6**/3* | 0.572 | 1.519 |

* Espessura da camada de vidro; ** Espessura da caixa de ar

CAPÍTULO 4 – DESEMPENHO ENERGÉTICO DO EDIFÍCIO

No capítulo quarto são apresentados os resultados da simulação do desempenho termo-energético do edifício existente, analisando o seu comportamento térmico assim os seus consumos energéticos. Para esta simulação foram tidas em conta apenas as soluções construtivas originais do edifício.

De seguida, foram feitas várias simulações do desempenho do edifício, incorporando cada medida de reabilitação proposta, individualmente e de seguida em conjunto para determinar as melhorias conseguidas no desempenho termo-energético do edifício. Foi também feita uma análise económica de viabilidade e calculado o período de retorno de investimento para as soluções de reabilitação selecionadas.

4.1 Qualidade do ambiente interior

Para avaliar a qualidade do ambiente interior foram estudados três espaços, nomeadamente, o quarto com maior área e ocupação, o escritório com maior área e a sala de estar. Este edifício está localizado na cidade de Viana do Castelo, tendo, portanto, boa qualidade do ar exterior, sendo o valor da perceção da qualidade do ar exterior, $C_{e,0}$, considerado de 0.1 dp. A abertura das janelas do edifício proporciona uma boa ventilação ao mesmo, sendo a eficácia de ventilação (ϵ_v) considerada de 0.9.

Sendo este um edifício existente que utiliza materiais pouco poluentes, foi considerado como sendo um edifício low-polluting (pouco poluente) considerando um valor médio de carga sensorial de 0.10 olf/m². Os ocupantes do edifício não são fumadores e desenvolvem atividades do tipo sedentária (1 a 1,2 met), sendo considerada uma carga sensorial de 1 olf/pessoa.

Foi calculado o valor total da carga sensorial (carga sensorial emitida pelos ocupantes mais a carga sensorial emitida pelos materiais do edifício) para cada espaço e de seguida foi calculada a taxa de ventilação necessária para assegurar a qualidade do ar interior e o conforto dos ocupantes em cada zona estudada, tendo em conta que perceção da qualidade do ar interior pretendida toma o valor de ($C_{e,i} = 1.4$ dp, para um edifício de Classe B – com exigência corrente, como é o caso de edifícios novos ou reabilitados, de acordo com a norma EN 16798-1).

Os resultados que estão apresentados na Tabela 16 foram calculados seguindo os pressupostos referidos na secção 3.4.

Tabela 16 – Cálculo da taxa de ventilação para cada zona

| Zona / ocupação | Carga sensorial (ocupantes) (olf) | Carga sensorial (materiais do edifício) (olf) | Carga sensorial total (olf) | Taxa de ventilação necessária (l/s) | Taxa de ventilação necessária (ach) |
|-----------------|-----------------------------------|---|-----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Quarto / 2 | 2 | 1.83 | 3.87 | 33.19 | 2.35 |
| Escritório / 2 | 2 | 1.75 | 3.75 | 32.05 | 2.44 |
| Sala / 4 | 4 | 4.07 | 8.07 | 68.97 | 2.26 |

As taxas de ventilação necessárias para garantir a qualidade do ar interior e o conforto dos ocupantes, durante o período de ocupação, para o quarto com maior área e ocupação, o escritório com maior área e a sala de estar, foram, respetivamente, 2.35 rph, 2.44 rph e 2.26 rph. Estas taxas de ventilação são superiores aos valores estipulados pela norma EN 16798-1 (2019), que sugere um valor mínimo de 0.6 ach de taxa de ventilação em zonas como quartos e salas, para edifícios de categoria II (máximo de 20% dos ocupantes descontentes) num edifício.

Para garantir a qualidade do ambiente interior, durante os períodos de ocupação, seria necessário que os ocupantes abrissem as janelas, ou a implementação de grelhas de ventilação autorreguláveis, ou um sistema de ventilação mecânica que assegurasse a taxa de ventilação pretendida. Estas medidas teriam um impacto nos consumos energéticos do edifício, devido às maiores necessidades energéticas devido à ventilação, acrescidos dos consumos do sistema mecânico. Assim, deverá ser dada, sempre que possível maior importância à ventilação natural, através da abertura de janelas e/ou outros meios de contacto com o exterior, como por exemplo as portas.

Neste estudo, foi considerada a taxa de renovação de ar de 0.6 rph, preconizada na norma EN 16798-1: 2019 (*Energy performance of buildings. Ventilation for buildings. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*), que é também a definida na norma ANSI/ASHRAE Standard 62.2:2019 (*Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings*) (CEN, 2019; ASHRAE, 2019). Este valor é também o considerado no Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) para a taxa de ventilação de referência do edifício na estação de aquecimento.

4.2 Simulação do desempenho energético do edifício

Com o auxílio do programa de simulação dinâmica do desempenho térmico e energético *DesignBuilder* foi feita uma simulação do edifício no seu estado original, tendo como principal foco de análise das condições de conforto térmico e os consumos energéticos do edifício. A simulação em causa foi realizada para o período de um ano. A análise foi realizada considerando o sistema de aquecimento existente no edifício, caldeira a gás natural, com uma eficiência de 0,62. Como o edifício não possui sistema de arrefecimento, para o cálculo dos consumos energéticos de arrefecimento foi considerado no modelo de simulação um sistema de ar condicionado, com um COP (*coeficiente of performance*) de 1.32 para que desta forma fosse possível a análise da necessidade de implementação do mesmo. Todos os valores de seguida apresentados em (kWh/m². ano) tem em consideração uma área útil de cerca de 122 m².

Num edifício existem ganhos térmicos, que provêm da radiação solar que incide nos vãos envidraçados do edifício (ganhos solares), e também os associados à ocupação do edifício, equipamentos (eletrodomésticos, multimédia) ou iluminação. Na Tabela 17 está representada a distribuição dos ganhos térmicos do edifício por cada tipo de fonte. Na Tabela 17 é possível verificar que os ganhos solares são os responsáveis por cerca de 64.6% dos ganhos térmicos do edifício, os equipamentos, iluminação e ocupação são responsáveis por cerca de 13.4%, 9.8% e 11.9% respetivamente.

Tabela 17 - Distribuição dos ganhos térmicos do edifício por tipo de fonte

| | Ganhos térmicos (kWh/ano) |
|----------------|---------------------------|
| Ganhos solares | 7739.46 |
| Equipamentos | 1612.57 |
| Iluminação | 1180.46 |
| Ocupação | 1435.54 |

Na Tabela 18 estão apresentados os consumos energéticos do edifício, divididos em consumos para aquecimento, arrefecimento, iluminação, equipamentos e aquecimento de águas quentes sanitárias.

Analisando a Tabela 18 é possível verificar que os consumos com aquecimento são responsáveis por cerca de 44.5% dos consumos do edifício, seguidos dos consumos com equipamentos (eletrodomésticos, multimédia) 22.5%. Os consumos com a iluminação do edifício são responsáveis por 16.4% dos consumos

do edifício. A produção de AQS é responsável por 14.6% dos consumos e o arrefecimento ambiente por apenas 1.7% dos consumos totais do edifício.

Tabela 18 - Consumos energéticas do edifício no seu estado original

| | Consumos energéticos (kWh/ano) | Consumos energéticos (kWh/m ² . ano) |
|--------------------------|-----------------------------------|--|
| Aquecimento | 3194.42 | 26.18 |
| Arrefecimento | 125.09 | 1.02 |
| Iluminação | 1180.46 | 10.54 |
| Equipamentos | 1612.57 | 13.22 |
| Águas Quentes Sanitárias | 1051.65 | 8.62 |
| Total | 7164.19 | 58.72 |

Para reduzir os consumos energéticos para a produção de águas quentes sanitárias seria recomendada a instalação de um sistema de coletores solares térmicos, mantendo-se a caldeira a gás natural como sistema de apoio. Como esta intervenção não iria afetar os consumos de energia para aquecimento e arrefecimento do edifício, nem é afetada pela intervenção na envolvente exterior em análise, a sua inclusão não foi considerada neste estudo.

Os consumos associados aos sistemas de iluminação poderiam ser reduzidos pela otimização da sua utilização em função da iluminação natural. O consumo dos equipamentos poderia ser reduzido utilizando sistemas de maior eficiência.

Neste estudo, como é pretendido avaliar o impacto da reabilitação da envolvente exterior do edifício no seu desempenho, não foi analisada a influência dos sistemas de iluminação, equipamentos, nem as necessidades energéticas associadas à produção de águas quentes sanitárias, uma vez que estas não seriam afetadas pela intervenção na envolvente (ou pouco afetadas pela alteração das soluções construtivas para os vãos envidraçados, no caso da iluminação natural que poderia afetar o uso de iluminação artificial).

Na Tabela 18, é também possível observar que o valor dos consumos anuais de arrefecimento é bastante inferior ao valor dos consumos de aquecimento anuais, cerca de 96% inferior. Considerando os consumos energéticos anuais (aquecimento e arrefecimento de 3319.51 kWh/ano), os consumos de arrefecimento correspondem a cerca de 3.7%, tendo um contributo reduzido para os consumos energéticos anuais do edifício.

Para verificar a necessidade de instalação de um sistema de arrefecimento no edifício foi efetuado o estudo das condições de conforto térmico (sem sistema de arrefecimento) dos ocupantes do edifício. A análise foi realizada para uma semana típica de verão, representativa das condições ambientais locais. Utilizando o *DesignBuilder* e selecionando a opção de simulação (Semana típica de verão), o edifício foi analisado para uma semana típica de verão no seu estado atual, e após a implementação da solução de reabilitação com uma combinação de medidas de reabilitação que implicasse a aplicação da maior quantidade de material de isolamento térmico na envolvente, que corresponde à situação em que é mais difícil a libertação do calor para o exterior. Esta combinação de medidas de reabilitação será apresentada e estudada no subcapítulo 4.3.

O estudo foi realizado considerando a metodologia de conforto térmico adaptativo definida na norma ASHRAE 55: 2017, considerando a temperatura operativa interior mais alta registada numa semana típica de verão e a temperatura exterior média mensal predominante (ASHRAE, 2017). Foram também consideradas as horas de desconforto dos ocupantes do edifício durante a semana em estudo. Com estes dados é possível avaliar o desempenho do edifício na estação de arrefecimento e verificar a necessidade de implementação de um sistema de arrefecimento.

A aplicação do método de conforto térmico adaptativo preconizado na norma ASHRAE 55:2017 foi realizada com o auxílio do modelo de conforto térmico da ferramenta de CBE Thermal Comfort Tool (Hoyt *et al.*, 2019). Foi assim possível, com base nos valores das temperaturas registadas prever se os ocupantes do edifício se encontram em situação de conforto térmico. A análise foi efetuada para a sala de estar do edifício, pois é a divisão do edifício que tem maior número de vãos envidraçados, estando mais exposta aos ganhos solares incidentes, sendo também a zona que por norma os quatro ocupantes do edifício ocupam com mais frequência, principalmente durante a estação de arrefecimento.

Na Tabela 19 é apresentada a análise de conforto térmico adaptativo de acordo com a metodologia definida na ASHRAE 55:2017.

Com base nos dados retirados das duas simulações é possível constatar que para o caso do edifício reabilitado a temperatura operativa interior máxima teve um aumento muito reduzido, bem como as horas de desconforto dos ocupantes. Os ocupantes, na simulação do edifício reabilitado, para a semana típica de

verão estão 23.1 horas desconfortáveis (86.28% da semana os ocupantes estão em situação de conforto) e 3.3 horas por dia desconfortáveis (86.29% do dia os ocupantes estão em situação de conforto).

Tabela 19 – Análise das condições de conforto térmico para uma semana típica de verão

| Simulação | Temperatura operativa interior mais alta medida | Temperatura exterior média | Em conforto térmico | Horas de desconforto | Horas de desconforto por dia |
|-------------------------|---|----------------------------|---------------------|----------------------|------------------------------|
| Edifício situação atual | 26.2 | 21.3 | Sim | 22.4 | 3.2 |
| Edifício reabilitado | 26.5 | 21.3 | Sim | 23.1 | 3.3 |

Na Figura 60 estão representados os gráficos para cada as duas situações, e que mostram que os ocupantes se encontram em situação de conforto em ambos os casos (Hoyt et al., 2019). Assim é possível confirmar o facto de não se justificar a implementação de um sistema de arrefecimento neste edifício, visto que os ocupantes do edifício, tanto na situação de edifício original como de edifício reabilitado, encontram-se em situação e conforto na semana típica de verão.

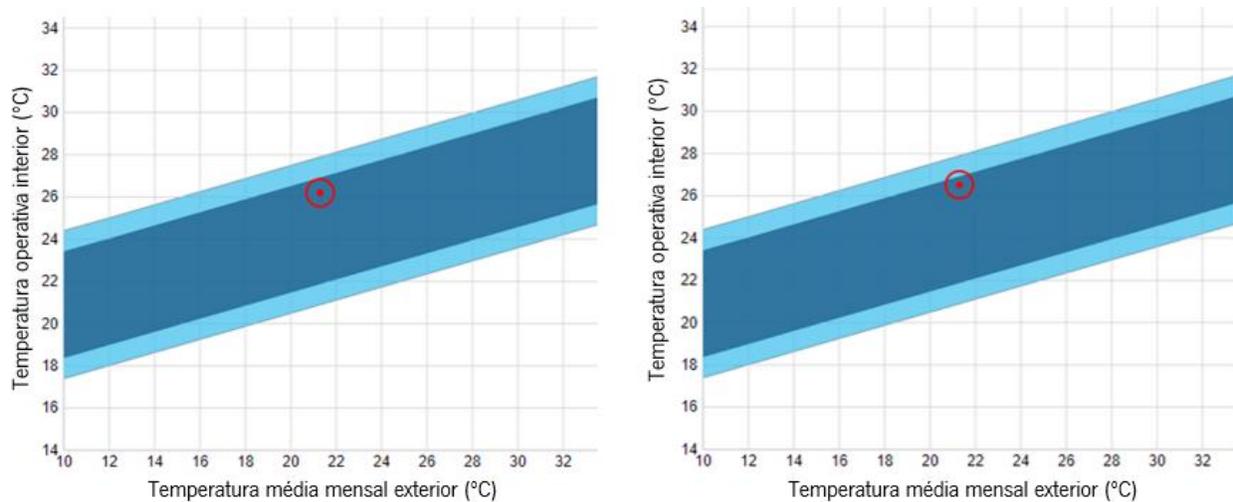


Figura 60 - Análise da situação de conforto térmico dos ocupantes da sala para a uma semana típica de verão - edifício na situação atual (esquerda) e após a reabilitação (direita) (Resultados obtidos através da ferramenta do CBE, (Hoyt *et al.*, 2019))

4.3 Simulação do edifício - medidas de reabilitação isoladas

Neste subcapítulo é apresentado o impacto no desempenho energético do edifício após a aplicação de cada uma das medidas de reabilitação propostas. As soluções de reabilitação foram inseridas no modelo do edifício utilizando o *DesignBuilder* e foram simuladas individualmente.

Reforço do nível de isolamento térmico das paredes exteriores

Efetuada as simulações do edifício para cada espessura de isolamento térmico é possível obter os valores dos consumos energéticos para cada caso, bem como as suas variações em relação ao edifício original. Os resultados obtidos em cada simulação estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Consumos energéticos de aquecimento - reforço do nível de isolamento térmico das paredes exteriores

| Solução de reabilitação das paredes exteriores | Consumos energéticos para aquecimento | | Variação em relação ao edifício original (%) |
|--|---------------------------------------|---------------------------|--|
| | (kWh/ano) | (kWh/m ² .ano) | |
| Edifício original | 3194.42 | 26.18 | - |
| ETICS4 | 2468.04 | 20.23 | -22.7 |
| ETICS6 | 2362.60 | 19.36 | -26.0 |
| ETICS8 | 2274.98 | 18.65 | -28.8 |

Tal como esperado, verificou-se que a solução de reabilitação (ETICS8) é a que apresenta maior redução nos consumos energéticos para aquecimento (-28.8%). O reforço do nível do isolamento térmicos das paredes exteriores aplicando o sistema ETICS originou reduções nas perdas de calor através destes elementos. Com a aplicação da solução de reabilitação ETICS4 foi possível obter uma redução nas perdas de calor através das paredes exteriores de cerca de 726 kWh/ano. Relativamente às soluções de reabilitação ETICS6 e ETICS8, atingiu-se reduções nas perdas de calor através das paredes exteriores de aproximadamente 831 kWh/ano e 919 kWh/ano, respetivamente. Para a análise das combinações de medidas de reabilitação, as soluções selecionadas do reforço de isolamento térmico das paredes exteriores foram as soluções ETICS4 e ETICS8.

Isolamento térmico da cobertura

Tal como foi feito para a análise do reforço de isolamento das paredes exteriores, o reforço de isolamento térmico da cobertura do edifício foi estudado considerando diferentes espessuras de isolamento térmico e foram feitas as respetivas simulações por forma a obter os valores dos consumos energéticos para cada caso. Na Tabela 21, estão apresentados os dados obtidos em cada simulação.

Tabela 21 - Consumos energéticos para aquecimento - reforço do nível de isolamento térmico da cobertura

| Simulação | Consumos energéticos de aquecimento | | Variação (%) |
|-------------------|-------------------------------------|---------------------------|--------------|
| | (kWh/ano) | (kWh/m ² .ano) | |
| Edifício original | 3194.42 | 26.18 | - |
| C4 | 2898.93 | 23.76 | -9.3 |
| C6 | 2802.40 | 22.97 | -12.3 |
| C8 | 2739.30 | 22.45 | -14.3 |

Novamente, tal como esperado, a solução de reabilitação (C8) é a que apresenta maior redução dos consumos energéticos para aquecimento (-14.3%). Com a aplicação da solução de reabilitação da cobertura C4 verificou-se uma redução nas perdas de calor através da cobertura de cerca de 295 kWh/ano. Relativamente às soluções de reabilitação C6 e C8, atingiu-se reduções nas perdas de calor através da cobertura de aproximadamente 392 kWh/ano e 455 kWh/ano, respetivamente. As soluções de reforço de isolamento térmico da cobertura selecionadas para a análise das combinações de medidas de reabilitação são as soluções C4 e C8.

Vãos envidraçados

O edifício foi simulado novamente alterando apenas a solução construtiva dos vãos envidraçados, considerando as quatro soluções de reabilitação propostas (Tabela 15). Para cada simulação, foram analisados os consumos energéticos para aquecimento do edifício, os ganhos solares e a variação destes valores em relação ao desempenho do edifício com os vãos envidraçados originais. Estes dados estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - Consumos energéticas de aquecimento - vãos envidraçados

| Designação | Consumos para aquecimento (kWh/ano) / (kWh/m ² .ano) | | Varição (%) | Ganhos solares (kWh/ano) | Varição (%) |
|-------------------|--|-------|-------------|-----------------------------|-------------|
| Edifício original | 3194.42 | 26.18 | - | 7739.46 | - |
| VE1 | 3280.03 | 26.88 | 2.68 | 6007.09 | -22.4 |
| VE2 | 3124.14 | 25.60 | -2.20 | 6628.76 | -14.4 |
| VE3 | 2882.46 | 23.63 | -9.77 | 6698.37 | -13.5 |
| VE4 | 3228.92 | 26.46 | 1.08 | 5534.79 | -28.5 |

Ao colocar um sistema de vidro duplo, é possível melhorar termicamente a envolvente de um edifício, reduzindo as trocas de calor, mas por outro lado reduzem-se os ganhos solares face à solução de vidro simples originalmente utilizada no edifício. Assim, com a solução (VE1), a melhoria do desempenho térmico da envolvente do edifício proporcionaria reduções dos consumos energéticos devido à redução das perdas através dos vãos envidraçados, no entanto, a redução dos ganhos solares foi superior, o que conduziu a aumentos nos consumos energéticos para aquecimento do edifício.

Com a utilização de um vidro duplo mais fino (VE2), foi possível controlar melhor a redução dos ganhos solares e por consequência originar uma redução ligeira nos consumos energéticos do edifício, consequência da redução das perdas através dos vãos envidraçados. A utilização de vidro triplo (VE4) também reduziu os ganhos solares, tal como explicado anteriormente, originando aumentos nos consumos energéticos para aquecimento do edifício.

A solução que teve melhor comportamento, foi a solução de vidro duplo de 4mm e uma caixa de ar com 12 mm de espessura (VE3). Assim, apesar da redução dos ganhos solares foi possível assegurar uma maior redução das perdas através dos vãos envidraçados e dos consumos energéticos em relação à solução de vidro simples. A solução (VE3) foi a solução mais eficaz, e será a utilizada posteriormente nas simulações de combinações de medidas de reabilitação.

4.4 Simulação do edifício - combinação de medidas de reabilitação

Por forma a analisar melhor o impacto e viabilidade das medidas de reabilitação anteriormente analisadas foi feito um estudo do impacto da implementação de combinações das soluções de reabilitação propostas. Este estudo divide-se em oito simulações diferentes, e visa analisar de que forma as soluções de reabilitação

propostas melhoram o desempenho energético do edifício, quando integradas em simultâneo. As oito simulações realizadas estão representadas na Tabela 23, sendo que a solução proposta para os vãos envidraçados é a solução VE3. As propostas de reabilitação (ETICS6) e (C6) apesar de serem possíveis alternativas, não foram usadas nas combinações de soluções, por uma questão de simplificação, dando uso apenas à melhor e pior solução de reforço de isolamento das paredes exteriores e cobertura.

Tabela 23 - Combinação de medidas de reabilitação

| Medidas de reabilitação | Combinação de medidas de reabilitação | | | | | | | |
|-------------------------|---------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| ETICS4 | | | | | x | x | | |
| ETICS8 | x | x | x | | | | x | x |
| C4 | | | | | | | x | x |
| C8 | x | x | | x | x | x | | |
| VE3 | | x | x | x | | x | | x |

O edifício foi simulado para cada uma das oito combinações de soluções de reabilitação propostas, analisando para cada simulação os valores dos consumos energéticos de aquecimento. Na Tabela 24 apresentam-se os dados de cada simulação e respetivas variações em relação ao edifício original.

Tabela 24 - Consumos energéticos associados ao aquecimento para cada combinação de medidas de reabilitação

| Combinação de soluções de reabilitação | Consumos para aquecimento | | Variação (%) |
|--|---------------------------|---------------------------|--------------|
| | (kWh/ano) | (kWh/m ² .ano) | |
| Edifício original | 3194.42 | 26.18 | - |
| 1 (ETICS8 + C8) | 1761.81 | 14.44 | -44.9 |
| 2 (ETICS8 + C8 + VE3) | 1453.33 | 11.91 | -54.5 |
| 3 (ETICS8 + VE3) | 1950.77 | 15.99 | -38.9 |
| 4 (C8 + VE3) | 2328.20 | 19.08 | -27.1 |
| 5 (ETICS4 + C8) | 1966.34 | 16.12 | -38.4 |
| 6 (ETICS4 + C8 +VE3) | 1656.60 | 13.58 | -48.1 |
| 7 (ETICS8 + C4) | 1993.83 | 16.34 | -37.6 |
| 8 (ETICS8 + C4 + VE3) | 1622.76 | 13.30 | -49.2 |

Tal como se pode verificar pela análise dos dados apresentados na Tabela 24, a combinação 2 (ETICS8 + C8 + VE3) é a combinação de soluções de reabilitação que conduz a uma maior redução dos consumos energéticos para aquecimento do edifício, conseguindo atingir reduções de cerca de -54.5%.

4.5 Análise económica

Custos de intervenção

Com base nos custos (€/m²) para cada solução, apresentados no subcapítulo 3.6, foram determinados os custos globais (multiplicando esses valores pela respetiva área), obtendo desta forma o custo de investimento da execução dessa medida de reabilitação. A área da fachada, da cobertura e dos vãos envidraçados são respetivamente, 188.36 m², 87.81 m² e 21.84 m².

Na Tabela 25 estão apresentados os custos de investimento para cada medida de reabilitação proposta, apresentando também a variação dos consumos energéticos para aquecimento em relação ao edifício original.

Tabela 25 - Variação dos consumos energéticos para aquecimento e custo de investimento de cada medida de reabilitação individual

| Medida de reabilitação | Variação dos consumos energéticos (%) | Custo de investimento (€) |
|------------------------|---------------------------------------|---------------------------|
| ETICS4 | -22.7 | 8864.08 |
| ETICS6 | -26.0 | 9649.52 |
| ETICS8 | -28.8 | 10491.47 |
| C4 | -9.3 | 964.15 |
| C6 | -12.23 | 1253.93 |
| C8 | -14.3 | 1631.51 |
| VE3 (4/12/4) | -9.8 | 810.63 |

Em relação as medidas de reabilitação da envolvente opaca a solução de reabilitação da cobertura (C4) é a solução mais económica, e a solução de reabilitação da fachada foi a mais dispendiosa (devido ao maior custo por metro quadrado e à maior área de implantação), sendo também a que proporcionou maiores reduções dos consumos energéticos para aquecimento do edifício, consequência de ser o elemento da envolvente exterior que contribui mais para as perdas do edifício, cerca de 47%.

Tendo em conta os dados da Tabela 25, é possível obter os custos de investimento para as diferentes combinações de medidas de reabilitação anteriormente apresentadas. Na Tabela 26 apresentam-se os custos de investimento das combinações de medidas de reabilitação e respetivas variações dos consumos energéticos para aquecimento em relação ao edifício original.

Tabela 26 - Variação dos consumos energéticos para aquecimento e custo de investimento para cada combinação de medidas de reabilitação

| Combinação de medida de reabilitação | Variação dos consumos energéticos (%) | Custo de investimento (€) |
|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|
| 1 (ETICS8 + C8) | -44.9 | 14083.81 |
| 2 (ETICS8 + C8 + VE3) | -54.5 | 14894.44 |
| 3 (ETICS8 + VE3) | -38.9 | 13262.93 |
| 4 (C8 + VE3) | -27.1 | 2442.14 |
| 5 (ETICS4 + C8) | -38.4 | 12456.41 |
| 6 (ETICS4 + C8 +VE3) | -48.1 | 13267.04 |
| 7 (ETICS8 + C4) | -37.6 | 13416.45 |
| 8 (ETICS8 + C4 + VE3) | -49.2 | 14227.08 |

Em relação às combinações de medidas de reabilitação, a combinação de reabilitação da cobertura e substituição dos vãos envidraçados foi a mais barata, sendo também esta combinação a que origina menores reduções dos consumos energéticos. Por outro lado, a combinação de reabilitação da fachada, da cobertura e substituição dos vãos envidraçados é a mais dispendiosa, mas também a que origina maiores reduções dos consumos energéticos do edifício.

Tendo em consideração a variação do preço do gás natural ao longo dos anos (Secção 3.6) foi possível obter o custo total dos consumos energéticos associado ao aquecimento do edifício para cada medida de reabilitação implementada. Na Tabela 27 e na Tabela 28, apresentam-se os consumos energéticos anuais para aquecimento, os custos totais relativos aos consumos energéticos anuais para aquecimento, a estimativa das possíveis poupanças de custos aquando da implementação das diferentes medidas de reabilitação e combinação das mesmas e o respetivo período de retorno do investimento.

Tabela 27 - Estimativa das possíveis poupanças de custos relativos à redução dos consumos energéticos associados ao aquecimento e período de retorno de investimento - medidas de reabilitação individuais

| Medida de reabilitação | Consumos energéticos anuais para aquecimento (kWh/ano) | Custo (Ano 0 - Ano 30) (€) | Poupança (Ano 0 - Ano 30) (€) | Retorno de investimento (anos) |
|------------------------|--|----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Edifício Original | 3194.42 | 8272.96 | - | - |
| ETICS4 | 2468.04 | 6391.77 | 1881.19 | 74 |
| ETICS6 | 2361.60 | 6118.70 | 2154.26 | 72 |
| ETICS8 | 2274.98 | 5891.78 | 2381.18 | 72 |
| C4 | 2898.93 | 7507.69 | 765.26 | 35 |
| C6 | 2802.40 | 7257.70 | 1015.26 | 35 |
| C8 | 2739.30 | 7094.28 | 1178.68 | 38 |
| V Duplo 4/12/4 | 2282.46 | 7465.03 | 807.93 | 30 |

Tabela 28 - Estimativa das possíveis poupanças de custos relativos à redução dos consumos energéticos associados ao aquecimento e período de retorno de investimento - combinação de medidas de reabilitação

| Combinação de medidas de reabilitação | Consumos energéticos anuais para aquecimento (kWh/ano) | Custo (Ano 0 - Ano 30) (€) | Poupança (Ano 0 - Ano 30) (€) | Retorno de investimento (anos) |
|---------------------------------------|--|----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Edifício Original | 3194.42 | 8272.96 | - | - |
| 1 (ETICS8 + C8) | 1761.81 | 4562.76 | 3710.20 | 67 |
| 2 (ETICS8 + C8 + VE3) | 1453.33 | 3763.86 | 4509.10 | 62 |
| 3 (ETICS8 + VE3) | 1950.77 | 5052.13 | 3220.82 | 70 |
| 4 (C8 + VE3) | 2328.2 | 6029.61 | 2243.35 | 31 |
| 5 (ETICS4 + C8) | 1966.34 | 5092.46 | 3180.50 | 68 |
| 6 (ETICS4 + C8 + VE3) | 1656.6 | 4290.29 | 3982.67 | 63 |
| 7 (ETICS8 + C4) | 1993.83 | 5163.65 | 3109.31 | 71 |
| 8 (ETICS8 + C4 + VE3) | 1622.76 | 4202.65 | 4070.31 | 64 |

De notar que a combinação de reabilitação da fachada, da cobertura e substituição dos vãos envidraçados (ETICS8 + C8 + VE3) foi a que gerou maiores poupanças ao fim de 30 anos, consequência de ser também a combinação que obteve maiores reduções dos consumos energéticos em relação ao edifício base. Contudo

esta combinação pode não ser a mais viável, tendo em conta que também é a combinação que tem mais custos de investimento e manutenção.

Para a análise da viabilidade das combinações de medidas de reabilitação acima estudadas, foi necessário calcular o respetivo período de retorno de investimento. Tendo em consideração o preço do gás natural em cada ano, o custo associado aos consumos energéticos para aquecimento em cada ano, e a poupança conseguida em cada ano, é possível identificar o número de anos decorridos até que se verifique a igualdade entre o custo de investimento das medidas de reabilitação e a poupança adquirida. A análise que se segue, teve em consideração uma extensão de 30 anos da vida útil do edifício, logo pode-se considerar uma solução não tão viável caso esta apresente períodos de retorno de investimento superiores a 30 anos, ou superiores à sua vida útil.

As medidas de reabilitação que obtiveram maior período de retorno de investimento foram as medidas de reabilitação da fachada do edifício (ETICS4, ETICS6, ETICS8), respetivamente, 74 anos, 72 anos e 72 anos. Estes valores elevados devem-se ao facto de os custos de investimento destas soluções serem elevados, ao facto do preço do gás ser baixo em comparação ao preço da eletricidade, por exemplo, mas também está relacionado com o impacto que estas soluções tiveram na redução dos consumos energéticos.

Este edifício, construído em 1991, já apresentava paredes exteriores duplas com caixa de ar e isolamento térmico, ou seja, a aplicação do sistema ETICS iria proporcionar reduções nos consumos energéticos, mas não seria uma solução viável economicamente em comparação à aplicação do mesmo reforço da fachada num edifício com paredes exteriores energeticamente menos eficientes. Esta observação vem ao encontro de outros trabalhos reportados na literatura, nomeadamente por Ferreira, Almeida & Rodrigues (2014), que referem que para edifícios construídos após 1990, as melhorias da envolvente exterior são menos económicas porque as condições iniciais do edifício já são melhores. O reforço de isolamento térmico da cobertura (C4, C6 e C8) e a substituição dos vãos envidraçados, são as soluções que apresentam menor período de retorno de investimento, respetivamente, 35 anos, 35 anos, 38 anos e 30 anos. Em relação às combinações de medidas de reabilitação, as combinações que incluem a medida de reabilitação das paredes exteriores apresentam períodos de retorno de investimento bastante superiores aos 30 anos. A combinação de medidas de reabilitação 4 (C8 + VE3), que inclui o reforço do isolamento térmico da cobertura e a substituição dos vãos envidraçados, foi a combinação que apresentou menor período de retorno de investimento, cerca de 31 anos.

Nas Figuras 61 e 62 estão representadas todas as medidas de reabilitação, as combinações de medidas de reabilitação e os respetivos custos acumulados referentes aos custos de investimento, custos de manutenção e custos associados ao consumo de energia para aquecimento do edifício. Tal como referido anteriormente, o estudo de viabilidade económica foi realizado considerando uma extensão da vida útil do edifício de mais 30 anos, apesar de a maior parte das soluções construtivas terem obtido um período de retorno de investimento superior a 30 anos. Assim, os custos de manutenção decenais relativos ao sistema ETICS foram apenas considerados nos primeiros 30 anos. Não foi considerado neste trabalho a substituição dos sistemas de reabilitação aplicados no fim da sua vida útil pois isso aconteceria após os 30 anos inicialmente estabelecidos para este caso de estudo.

Na Figura 61 é possível observar que a linha amarela, que corresponde ao edifício original, não tem qualquer custo de investimento inicial e a que apresenta maiores custos acumulados. As soluções de reabilitação C4, C6, C8 e VE3 são as soluções que possuem menores custos de investimento e que tem um período de retorno de investimento mais baixo, cruzando a linha amarela (edifício original) primeiro que as soluções de reabilitação ETICS4, ETICS6 e ETICS8.

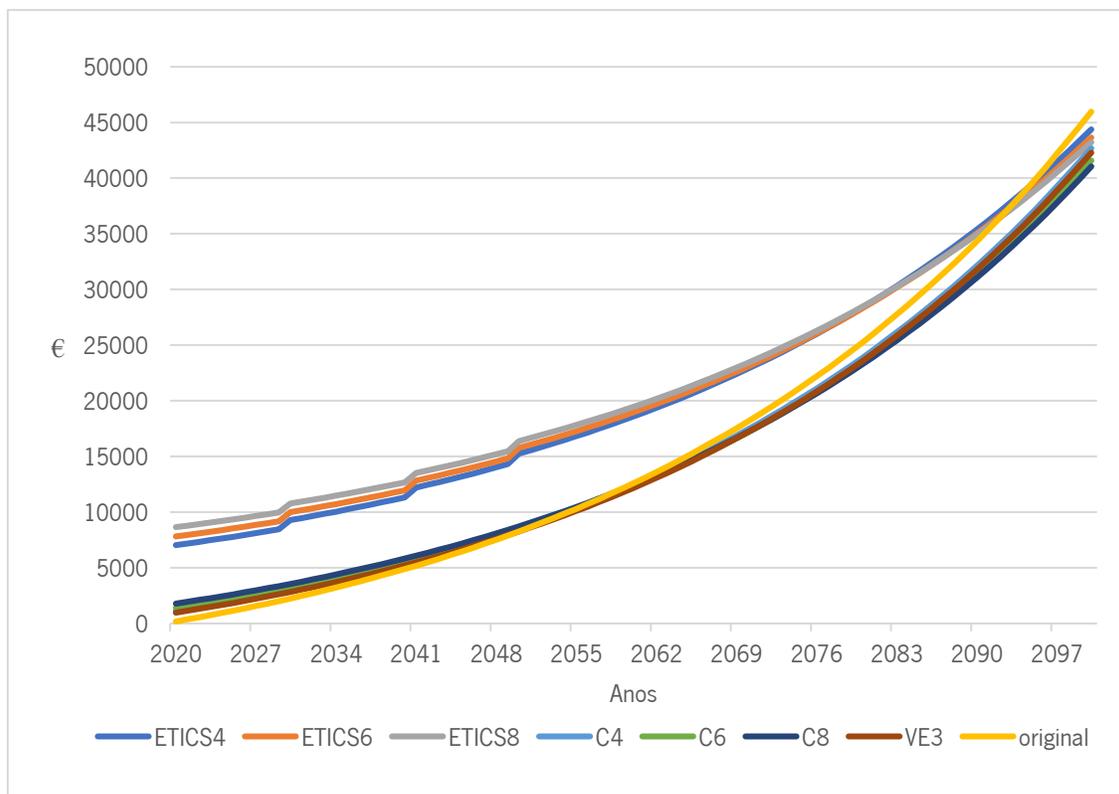


Figura 61 - Custos acumulados - Soluções de reabilitação e edifício original

Na Figura 62, que difere da Figura 61 por apresentar combinações de medidas de reabilitação, é possível observar que a solução economicamente mais viável é a solução 4 (C8 + VE3), tal como referido anteriormente. Esta solução contempla o reforço do isolamento térmico da cobertura com 8 cm de espessura e a substituição do vidro simples por vidro duplo de 4 mm de espessura e caixa de ar de 12 mm de espessura. É possível também concluir que todas as restantes combinações de medidas de reabilitação, por incluírem o reforço do isolamento térmico das paredes exteriores, originaram períodos de retorno de investimento superiores aos 30 anos, tornando-se assim soluções inviáveis.

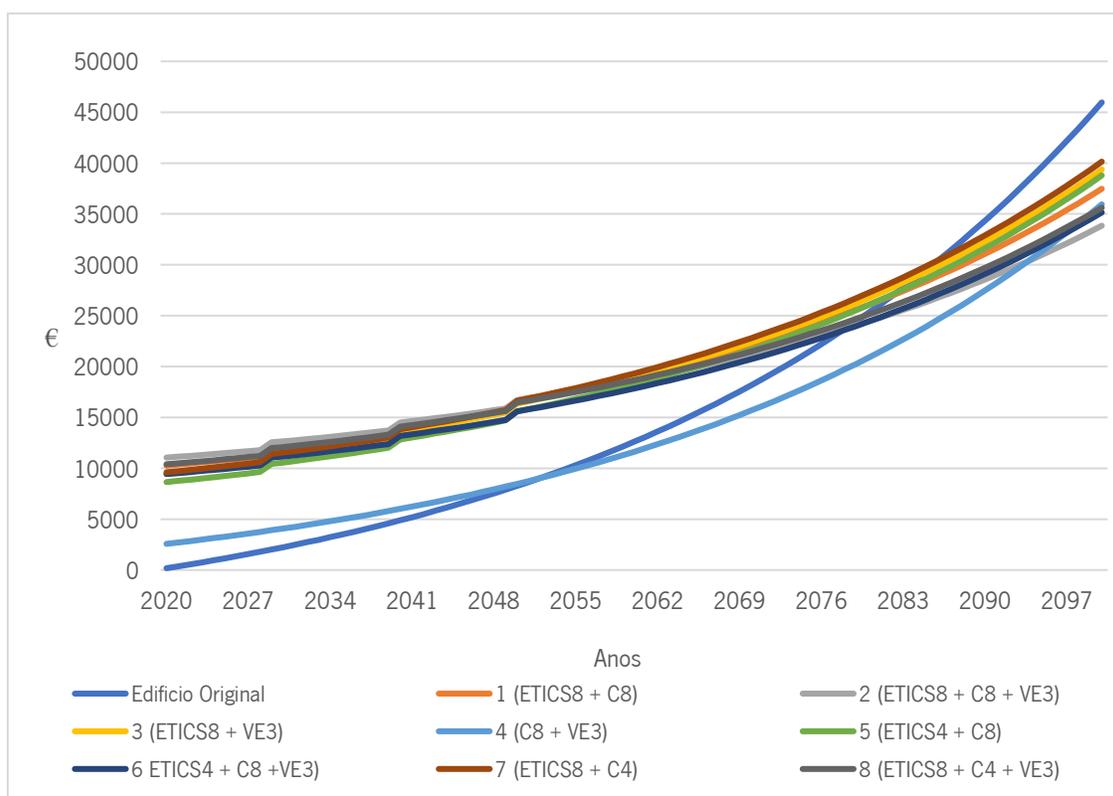


Figura 62 - Custos acumulados - Combinações de medidas de reabilitação e edifício original

Para a reabilitação ter viabilidade económica, de acordo com o estudo reportado por Ferreira, Almeida & Rodrigues (2015) seria importante conjugar as medidas de reabilitação da envolvente com as dos sistemas técnicos e a implementação de sistemas de aproveitamento de energia a partir de fontes renováveis como, por exemplo, a implementação de painéis solares para auxílio no aquecimento das águas quentes sanitárias, painéis fotovoltaicos para ajudar a reduzir os consumos de eletricidade do edifício e a substituição dos sistemas de aquecimento por outros com uma maior eficiência.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES e PERSPETIVAS FUTURAS

5.1 Conclusão

Nesta dissertação, recorreu-se o programa de simulação dinâmica do desempenho termo-energético *DesignBuilder* para estudar o desempenho energético de um edifício. Foram propostas várias soluções de reabilitação, o reforço de isolamento térmico das paredes exteriores e da cobertura e a substituição do tipo de vidro utilizado nos vãos envidraçados, mantendo a caixilharia em madeira existente, e foram inseridas no modelo de simulação do edifício em análise por forma a avaliar o impacto que teriam no desempenho energético do edifício. O edifício no seu estado original foi simulado e apresentou os seguintes consumos energéticos: consumos energéticos totais de 58.72 kWh/m².ano (7164.19 kWh/ano), sendo os consumos energéticos para aquecimento de 26.18 kWh/m².ano (3194.42 kWh/ano).

A análise dos resultados de todas as simulações efetuadas, reabilitação da envolvente opaca e reabilitação dos vãos envidraçados, permitiu as seguintes conclusões:

- A solução de reforço de isolamento térmico da fachada do edifício resulta em maiores reduções dos consumos energéticos para aquecimento do mesmo, próximo de 29% no caso da medida de reabilitação ETICS8 que utiliza um isolamento térmico com 8 cm de espessura. O edifício no seu estado original apresentava já paredes exteriores duplas com caixa de ar e isolamento térmico, e por isso a solução de reabilitação das paredes exteriores não teve um impacto significativo comparativamente à aplicação da mesma solução de reabilitação caso o edifício tivesse paredes exteriores com um desempenho energético mais baixo;
- A solução de reabilitação da cobertura resultou em reduções dos consumos energéticos para aquecimento do edifício, de cerca de 15% para o caso da medida de reabilitação C8 que utiliza um isolamento térmico com 8 cm de espessura;
- A substituição do tipo de vidro nos vãos envidraçados manteve a caixilharia em madeira de *kambala* original. Após todas as simulações efetuadas foi possível concluir que a solução VE3 (4*/12**/4* - * Espessura da camada de vidro; ** Espessura da caixa de ar) foi a solução que resultou numa maior redução dos consumos energéticos para aquecimento do edifício, cerca de 10%. As restantes soluções analisadas, nomeadamente, VE1 (6/6/6), VE2 (3/6/3) e VE4 (3/6/3/6/3) não apresentaram resultados favoráveis. A solução VE2 obteve uma redução dos consumos energéticos para aquecimento de 2%, não sendo este um valor significativo. De realçar que as soluções VE1 e

VE2 reduziram significativamente os ganhos solares do edifício, resultando num ligeiro aumento dos consumos energéticos para aquecimento do mesmo, respetivamente, 3% e 1%;

- Em relação às combinações de medidas de reabilitação simuladas, a combinação que aplicou a reabilitação da envolvente opaca com maior espessura de isolamento (ETICS8 e C8) e a substituição dos vãos envidraçados pela solução VE3, foi a combinação que apresentou maior redução dos consumos energéticos para aquecimento do edifício, cerca de 55%.

A análise do desempenho das combinações de medidas de reabilitação foi fundamental para o estudo de viabilidade económica das mesmas. Foi feito um estudo do custo de investimento e da poupança energética anual por forma a identificar quais as combinações de medidas de reabilitação mais viáveis. Neste estudo foi também calculado o período de retorno de investimento para cada combinação e permitiu as seguintes conclusões:

- A solução de reabilitação das paredes exteriores revelou-se a solução mais dispendiosa, uma vez que, tal como referido anteriormente, as paredes exteriores apresentam uma área a reabilitar bastante maior que a cobertura, e o seu custo de aplicação é também superior, cerca de três vezes mais;
- As combinações de medidas de reabilitação que deram uso à solução de reabilitação das paredes exteriores apresentaram períodos de retorno de investimento muito elevados, sendo que as combinações 2 (ETICS8 + C8 + VE3) e 6 (ETICS4 + C8 + VE3) foram as que apresentaram períodos de retorno de investimento mais baixos, respetivamente, 62 anos e 63 anos, não sendo consideradas viáveis para este caso. A combinação de medidas de reabilitação que apresentou menor período de retorno de investimento, cerca de 31 anos, foi a combinação 4 (C8 + VE3), que inclui o reforço do isolamento térmico da cobertura e a substituição dos vãos envidraçados, sendo esta a combinação mais viável apesar de não ser a combinação que conduz à maior redução dos consumos energéticos para aquecimento do edifício.

Tendo em conta a vida útil 25 a 40 anos de um sistema de reforço de isolamento térmico das paredes exteriores ou da cobertura, conclui-se que, apesar de haver uma redução nos custos anuais associados ao aquecimento, o investimento a quando da aplicação destas medidas nunca iria ser recuperado na vida útil considerado para estes sistemas de reforço de isolamento térmico.

Apesar de se ter comprovado que para este edifício não seria viável a execução das medidas de reabilitação estudadas, existem outras vantagens aquando da implementação das mesmas. A implementação destas medidas de reabilitação, para além de aumentar o conforto térmico dos ocupantes do edifício e reduzir os custos anuais associados ao aquecimento, irão também valorizar o imóvel, aumentando assim o seu estado de preservação.

O facto de o caso de estudo selecionado ser um edifício construído em 1990, não permitiu um impacto significativo das medidas de reabilitação, não tendo sido possível obter períodos de retorno de investimento viáveis. No entanto, mesmo com o caso de estudo selecionado, foi muito interessante realizar o estudo e perceber o efeito da aplicação de diferentes medidas de reabilitação, quer isoladas, quer em combinação.

Relativamente à qualidade do ar interior, foram calculadas as taxas de ventilação necessárias para garantir o conforto dos ocupantes para as três zonas estudadas, o quarto e escritório com maior área e a sala de estar. As taxas de ventilação obtidas, para o período de ocupação dos espaços, foram 2.35 rph, 2.44 rph e 2.26 rph, respetivamente. Segundo o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), e as normas EN 16798-1:2019 e ANSI/ASHRAE Standard 62.2:2019, é recomendada, para este tipo de edifícios, uma taxa de ventilação de 0.6 rph para garantir o conforto dos ocupantes e para a realização da análise do desempenho energético de edifícios. Assim, para assegurar o conforto dos ocupantes e garantir a qualidade do ambiente interior, durante os períodos de ocupação, seria necessário abrir as janelas do edifício com mais regularidade, implementar grelhas de ventilação autorreguláveis ou de um sistema de ventilação mecânica para que seja possível assegurar as taxas de ventilação necessárias.

A análise do conforto térmico (sem sistema de arrefecimento) dos ocupantes do edifício, mostrou que os ocupantes, para a situação do edifício reabilitado, se encontram em situação de conforto térmico, sem haver a necessidade de implementação de um sistema de arrefecimento no edifício. A temperatura operativa interior máxima teve um aumento muito reduzido, bem como as horas de desconforto dos ocupantes. Na simulação do edifício reabilitado, para a semana típica de verão, os ocupantes estão 23.1 horas desconfortáveis (86.28 % da semana os ocupantes estão em situação de conforto) e 3.3 horas por dia desconfortáveis (86.29 % do dia os ocupantes estão em situação de conforto).

No decorrer deste trabalho foram surgindo algumas dúvidas e foram tomadas decisões conscientes de acordo com os objetivos desta dissertação. Contudo, como avaliação crítica do meu trabalho, posso referir

como principais limitações do estudo não terem sido consideradas soluções de reabilitação associadas aos sistemas de climatização e não ter sido considerada a substituição dos componentes das soluções de reabilitação no final da sua vida útil.

5.2 Proposta para trabalhos futuros

Com base no trabalho desenvolvido, como perspectivas de trabalho futuro, sugere-se:

- Dar continuidade ao estudo realizado incluindo medidas de reabilitação ao nível dos sistemas técnicos;
- Alargar o estudo a mais edifícios, incluindo diferentes tipologias, data de construção e materiais usados, para posterior comparação de resultados entre todos os casos de estudo;
- Realizar um estudo da viabilidade da reabilitação de edifícios devolutos e em perigo de ruína;
- Promover a investigação sobre a utilização de novos materiais na reabilitação de edifícios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADENE. Reabilitação energética da envolvente de edifícios residenciais [Brochura]. (2013). Lisboa, Portugal.

ADENE. Janelas Eficientes [Brochura]. (2016a). Lisboa, Portugal.

ADENE. Isolamento de Coberturas [Brochura]. (2016b). Lisboa, Portugal.

ADENE. Guia SCE – Indicadores de Desempenho Energético (REH) [Brochura]. (2020). Lisboa, Portugal.

Aecweb. (n.d.) Destacamento de revestimento cerâmico em fachada [Imagem]. Disponível em <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/como-escolher-revestimentos-ceramicos-e-evitar-patologias/6088>

ANSI/ASHRAE Standard 55-2017. (2017). Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.

ANSI/ASHRAE Standard 62.2:2019. (2019). Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings.

APA. (2016). Agência Portuguesa do Ambiente - Qualidade do Ar Interior. Disponível em <https://apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=82&sub2ref=319> (Acedido em 23 de julho de 2020)

CEN. (2007). EN 15251:2007 *Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*. Disponível em <https://www.iea.org/policies/7029-en-152512007> (Acedido em 23 de julho de 2020)

CEN. (2019). EN 16798-1:2019 *Energy performance of buildings - Ventilation for buildings - Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics - Module M1-6*. Disponível em <https://www.cen.eu/news/brief-news/pages/en-2019-022.aspx> (Acedido em 31 de março de 2020)

Condotelecon (n.d.) Aplicação de isolamento térmico pelo exterior – ETICS [Imagem]. Disponível em <https://www.gondotelecon.com/servicos-no-porto-de-isolamento-termico-pelo-exterior-capoto-etics/>

Comissão Europeia. (2008). *Eficiência energética nos edifícios residenciais*. Disponível em https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/ieeprojects/files/projects/documents/enerbuilding_portuguese_guide_edificios_residenciais_pt.pdf (Acedido em 23 de julho de 2020).

Comissão Europeia. (2018a). *2030 climate & energy framework*. Disponível em https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_pt (Acedido em 20 de agosto de 2019).

Comissão Europeia. (2018b). *2050 long-term strategy*. Disponível em https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en (Acedido em 29 de agosto de 2019).

Conselho Europeu. (2018). *Alterações climáticas: medidas que a UE está a tomar*. Disponível em <https://www.consilium.europa.eu/pt/policies/climate-change/> (Acedido em 4 de setembro de 2019).

Cruz, H. (2009). *Patologias em pavimentos e cobertura de edifícios*. (Tese de Mestrado). Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

Decreto Lei n.º 78/2016 de 23 de novembro de Defesa Nacional. *Diário da República n.º 225/2016, Série I (2016)*. Disponível em www.dre.pt (Acedido em 15/09/2019).

Decreto Lei n.º 79/2006 de 4 de abril do Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações. *Diário da República n.º 67/2006, Série I-A (2006)*. Disponível em www.dre.pt (Acedido em 15/09/2019).

Decreto Lei n.º 80/2006 de 4 de abril do Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações. *Diário da República n.º 67/2006, Série I-A (2006)*. Disponível em www.dre.pt (Acedido em 15/09/2019).

Decreto Lei n.º 118/2013 de 20 de agosto do Ministério da Economia e do Emprego. *Diário da República n.º 159/2013, Série I (2013)*. Disponível em www.dre.pt (Acedido em 17/09/2019).

Decreto Lei n.º 95/2019 de 18 de julho da Presidência do Conselho de Ministros (Infraestruturas e Habitação). *Diário da República n.º 136/2019, Série I (2019)*. Disponível em www.dre.pt (Acedido em 17/09/2019).

DesignBuilder Software. (2002). Disponível em <https://designbuilder.co.uk/>.

DGEG. National plan for increasing the number of nearly zero-energy buildings in Portugal [Brochura]. (2013).

Directiva 2002/91/CE de 16 de dezembro do Parlamento Europeu e do Conselho. (2003). *Jornal Oficial das Comunidades Europeias*, 11, 65-71.

Directiva 2010/31/UE de 19 de maio do Parlamento Europeu e do Conselho. (2010). *Jornal Oficial da União Europeia*, L135, 13-35.

Directiva 2012/27/UE de 25 de outubro do Parlamento Europeu e do Conselho. (2012). *Jornal Oficial da União Europeia*, L, 1-56.

Douglas, J., Ransom, B. (2013). *Understanding Building Failures*. London: Routledge. doi:10.4324/9780203125175

EAPN. A Estratégia Europa 2020 [Relatório]. (2011).

EDP Comercial Tarifários. (n.d.) Disponível em <https://www.edp.pt/particulares/energia/tarifarios/> (Acedido em 10 de abril 2020).

EEA. Final energy consumption by sector and fuel [Relatório]. (2018).

Ferreira, M., Almeida, M. & Rodrigues, A. (2014). Cost optimality ranking of measures to improve the energy performance of the Portuguese building stock. 9th International Masonry Conference, Guimarães, Portugal.

Ferreira, M., Almeida, M. & Rodrigues, A. (2015). Custo ótimo de ciclo de vida na requalificação urbana da urbanização de Vila D'Este. CONPAT, Lisboa, Portugal.

Gerador de preços. (n.d.) Disponível em <http://www.geradordeprecos.info/> (Acedido em 5 de junho de 2020).

Gerador de preços (n.d.) Sistema ETICS Propam Aiserm “PROPAMSA” de isolamento térmico pelo exterior de fachadas [Imagem]. Disponível em http://www.geradordeprecos.info/obra_nova/Isolamentos_e_impermeabilizacoes/Isolamentos_termicos/NAS_Sistemas_ETICS_de_isolamento_e/NAS070_Sistema_ETICS_Propam_Aiserm__PROPA.html

Globalescolha (n.d.) Sistema ETICS Capoto [Imagem]. Disponível em <https://globalescolha.pt/servicos/sistema-etics/>

Gomes, J. (2011). *Reabilitação de Edifícios / Construção Nova – Situação na Beira Interior*. (Tese de Mestrado). Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal.

Gonçalves, R. (2014). *Técnicas de tratamento/controlo da humidade ascensional*. (Tese de Mestrado). Universidade do Porto, Porto, Portugal.

Governo aprova Plano Nacional de Energia e Clima 2021-2030 (2020, 21 de maio). *Revista Sábado*. Disponível em <https://www.sabado.pt/portugal/detalhe/governo-aprova-plano-nacional-de-energia-e-clima-2021-2030> (Acedido em 28 de maio de 2020).

Governo flexibiliza regras para recuperar edifícios que permitem poupar 40% nos custos. (2014, 20 de fevereiro). *Jornal Público*. Disponível em <https://www.publico.pt/2014/02/20/economia/noticia/governo-aprovou-regime-simplificado-euros-1624532> (Acedido em 13 de dezembro de 2019).

Hoyt T., Schiavon S., Tartarini F., Cheung T., Steinfeld K., Piccioli A. & Moon D. (2019). CBE Thermal Comfort Tool. Center for the Built Environment, University of California Berkeley.

INE. (2011). *Inquérito ao consumo de energia no setor doméstico 2010*. Disponível em <https://www.ine.pt> (Acedido em 22 de julho de 2019).

INE. (2011). *Inquérito ao consumo de energia no setor doméstico 2010*. Disponível em <https://www.ine.pt> (Acedido em 22 de julho de 2019).

INE. (2018a). *Alojamentos familiares clássicos*. Disponível em <https://www.ine.pt> (Acedido em 2 de agosto de 2019).

INE. (2018b). *Edifícios construídos por ano*. Disponível em <https://www.ine.pt> (Acedido em 2 de agosto de 2019).

INE. (2019). *Estatísticas da Construção e Habitação*. Disponível em <https://www.ine.pt> (Acedido em 23 de Julho de 2020).

Oitomeio. (2017). Eflorescências nas fachadas de edifícios [Imagem]. Disponível em <https://www.oitomeia.com.br/colunas/engenheiro-marcos/2017/09/16/calorzao-em-teresina-imoveis-de-luxo-sofrem-com-clima-e-perdem-valor-de-mercado/>

Klepeis, N.E., Nelson, W.C., Ott, W.R., Robinson, J.P., Tsang, A.M., Switzer, P., ..., Engelmann, W.H. (2001). The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): A Resource for Assessing Exposure to Environmental Pollutants. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 11, 231-252.

Madeira, C. (2009). *A Reabilitação Habitacional em Portugal*. (Tese de Mestrado). Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Marinho, M. (2014). *Diagnóstico de patologias associadas à humidade utilizando técnicas não destrutivas*. (Tese de Mestrado). Universidade do Porto, Porto, Portugal.

Moita, F. (2010). *Energia Solar Passiva*. Portugal: Argumentum.

Mundipol (n.d.) Poliuretano Injectado [Imagem]. Disponível em <https://mundipol.pt/poliuretano-injectado-mundipol/>

NFCA (n.d.) National Floor Covering Association [Imagem]. Disponível em www.floorcoveringreferencemanual.com/a10-acceptable-conditions.html

PATORREB. Grupo de estudos da patologia da construção da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto [Relatório]. (2015).

PORDATA. (2011). *Edifícios por época de construção*. Disponível em <https://www.pordata.pt> (Acedido em 6 de setembro de 2019).

PORDATA. (2018). *Energia final*. Disponível em <https://www.pordata.pt> (Acedido em 27 de outubro de 2019).

Progepom (n.d.) Sistema ETICS [Imagem]. Disponível em <http://progepom.pt/capoto-placa/>

Prosil, L. (2017). *A sustentabilidade na reabilitação de um edifício habitacional – caso de estudo*. (Tese de Mestrado). Universidade Fernando Pessoa, Porto, Portugal.

Quase metade das habitações do Porto e de Lisboa precisa de obras. (2014, 5 de julho). *Jornal de Notícias*. Disponível em <https://www.jn.pt/economia/quase-metade-das-habitacoes-do-porto-e-de-lisboa-precisa-de-obras-4009860.html?id=4009860> (Acedido em 20 de dezembro de 2019).

Raposo, T. (2009). *Durabilidade da Construção. Estimativa da Vida Útil de Revestimentos de Coberturas Planas*. (Tese de Mestrado). Universidade do Porto, Porto, Portugal.

REN. Cenários de Evolução da Procura de Gás Natural [Relatório]. (2014). Lisboa, Portugal.

Santos, M. (2016). *Manual de Controlo de Qualidade para Revestimentos de Pisos em Madeira*. (Tese de Mestrado). Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.

SCE. (2017). *Certificação Energética Dos Edifícios*. Disponível em <https://www.sce.pt/> (Acedido em 7 de novembro de 2019).

Silva, S. (2011a). *A Nova Regulamentação Térmica SCE – REH Transmissão Térmica Parâmetros Térmicos - Física das Construções* [Blackboard elearning]. Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

Silva, S. (2011b). *Conforto Térmico - Física das Construções* [Blackboard elearning]. Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

Silva, S. (2011c). *Qualidade do ar interior e ventilação natural - Física das Construções*. [Blackboard elearning]. Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

Simões, S.G., Gregório, V. & Seixas, J. (2016). Mapping fuel poverty in Portugal. *Energy Procedia*. 106, 155-165. doi:10.1016/j.egypro.2016.12.112.